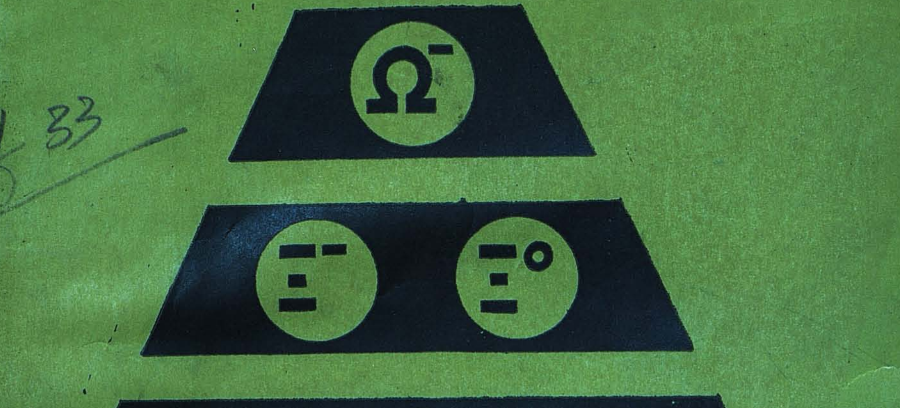
துகள் முடுக்கும் பொறிகள்

(PARTICLE ACCELERATORS)



டாக்டர். பி. திருஞான சம்பந்தம்
ப. சிவகுமார்

தமிழ்நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனம்

த. பா. நி. (க.வெ.) வரிசை எண்—353

துகள் முடுக்கும் பொறிகள்

அன்பளிப்பு
தமிழ்நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனம்
சென்னை.

ஆசிரியர்கள்

டாக்டர் பி. திருஞானசம்பந்தம், எம்.ஏ., பிஎச்.டி.
தலைமைப் பேராசிரியர்,

ப. சிவகுமார், எம். எஸ்ஸி.,
துணைப் பேராசிரியர்,
இயற்பியல் துறை,
மாநிலக் கல்லூரி, சென்னை-5.

தமிழ்நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனம்

First Edition—September, 1972

T.N.T.B.S. (C.P.) No. 353

Tamil Nadu Text Book Society

PARTICLE ACCELERATORS

DR. P. THIRUGNANASAMBANDAM
and P. SIVAKUMAR

PRICE RS. 11-50

'Published by the Tamil Nadu Text Book Society under the Centrally Sponsored Scheme of Production of books and literature in regional languages at the University level, of the Government of India in the Ministry of Education and Social Welfare (Department of Culture), New Delhi.'

Printed by
Metropolitan Printers,
Madras-2.

அணிந்துரை

திரு. இரா. நெடுஞ்செழியன்,
(தமிழகக் கல்வி–உள்ளாட்சித்துறை அமைச்சர்)

தமிழைக் கல்லூரிக் கல்வி மொழியாக ஆக்கிப் பன்னிரண்டாண்டுகள் ஆகிவிட்டன. குறிப்பிட்ட சில கல்லூரிகளில் பி.ஏ. வகுப்பு மாணவர்கள் தங்கள் பாடங்கள் அனைத்தையும் தமிழிலேயே கற்று வந்தனர். 1968ஆம் ஆண்டின் தொடக்கத்தில் புகுமுக வகுப்பிலும் (P.U.C.), 1969ஆம் ஆண்டிலிருந்து பட்டப் படிப்பு வகுப்புகளிலும் அறிவியல் பாடங்களையும் தமிழிலேயே கற்பிக்க ஏற்பாடு செய்துள்ளோம். தமிழிலேயே கற்பிப்போம் என முன்வந்துள்ள கல்லூரி ஆசிரியர்களின் ஊக்கம், பிற பல துறைகளிலும் தொண்டு செய்வோர் இதற்கெனத் தந்த உழைப்பு, நூலாசிரியர்கள் தொண்டுணர்ச்சி இவற்றின் காரணமாக இத் திட்டம் நம்மிடையே மகிழ்ச்சியும் மன நிறைவும் தரத்தக்க வகையில் நடைபெற்றுவருகிறது. இவ் வகையில், கல்லூரிப் பேராசிரியர்கள் கலை, அறிவியல் பாடங்களை மாணவர்க்குத் தமிழிலேயே பயிற்றுவிப்பதற்குத் தேவையான பயிற்சியைப் பெறுவதற்கு மதுரைப் பல்கலைக்கழகம் ஆண்டுதோறும் எடுத்துவரும் பெருமுயற்சியைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லவேண்டும்.

பல துறைகளில் பணிபுரியும் பேராசிரியர்கள் எத்தனையோ நெருக்கடிகளுக்கிடையே குறுகிய காலத்தில் அரிய முறையில் நூல்கள் எழுதித் தந்துள்ளனர்.

வரலாறு, அரசியல், உளவியல், பொருளாதாரம், தத்துவம், புவியியல், புவியமைப்பியல், மனையியல், கணிதம், இயற்பியல், வேதியியல், உயிரியல், வானியல், புள்ளியியல், விலங்கியல், தாவரவியல், பொறியியல் ஆகிய எல்லாத் துறைகளிலும் தனி நூல்கள், மொழிபெயர்ப்பு நூல்கள் என்ற இரு வகையிலும் தமிழ் நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனம் வெளியிட்டு வருகிறது.

இவற்றுள் ஒன்றான ' துகள் முடுக்கும் பொறிகள் ' என்ற இந் நூல் தமிழ்நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனத்தின் 353ஆவது வெளியீடாகும். இதுவரை 388 நூல்கள் வெளிவந்துள்ளன. இந் நூல் மைய அரசு கல்வி, சமூக நல அமைச்சகத்தின் மாநில மொழியில் பல்கலைக்கழக நூல்கள் வெளியிடும் திட்டத்தின்கீழ் வெளியிடப்படுகிறது.

உழைப்பின் வாரா உறுதிகள் இல்லை; ஆதலின், உழைத்து வெற்றி காண்போம். தமிழைப் பயிலும் மாணவர்கள் உலக மாணவர்களிடையே சிறந்த இடம் பெற வேண்டும். அதுவே தமிழன்னையின் குறிக்கோளுமாகும். தமிழ்நாட்டுப் பல்கலைக் கழகங்களின் பல்வகை உதவிகளுக்கும் ஒத்துழைப்புக்கும் நம் மனம் கலந்த நன்றி உரியதாகுக.

இரா. நெடுஞ்செழியன்

பொருளடக்கம்

			பக்கம்
1.	அறிமுகம்	...	1
2.	ஆய்வுரை விளக்கங்கள்	...	13
3.	முதற் பொறிகள்	...	50
4.	நேரியல் பொறிகள்	...	68
5.	கனவுதந்த பொறிகள்	...	106
6.	கருத்தூர்ந்த பொறிகள்	...	140
7.	எழிலார்ந்த பொறிகள்	...	161
8.	ஏற்றமிகு பொறிகள்	...	180
9.	அரும் பொறிகள்	...	205
10.	பொறிகளும் புதுமைகளும்	...	266
	மேற்கோள் நூல்கள் பட்டியல்	...	286
	கலைச்சொற்கள் (தமிழ்-ஆங்கிலம்)	...	287
	,, (ஆங்கிலம்-தமிழ்)	...	296

நூலில் பயன்பெறும் குறியீடுகள்

c	ஒளி வேகம்
M_0	ஓய்வு நிலை நிறை
M	இயக்க நிலை நிறை
T	இயக்க ஆற்றல்
E_0	ஓய்வு நிலை ஆற்றல்
E	இயக்க நிலை ஆற்றல்
v	துகளின் வேகம்
β	v/c
γ	(E/E_0)
V	மின்னழுத்தம்
V_m	மின்னழுத்த வீச்சு
p	உந்தம்
F	விசை
t	காலம்
τ	அலைவு நேரம்
q	மின்னூட்டம்
B	காந்தப்புலம்
f	துகளின் தடச்சுற்று அதிர்வெண்
ω_{rf}	அலைவானின் கோண அதிர்வெண்
ω	துகளின் கோண அதிர்வெண்
r	துகளின் தட ஆரம்
re	துகளின் நடுநிலைத் தட ஆரம்
n	புலஎண்
ϕ	துகளின் கலைக்கோணம்
ϕ_s	இசைவுறு துகளின் கலைக்கோணம்
a	உந்த இறுக்கம்
i	மின்னோட்டம்
C	மின் ஏற்புத்திறன்
ε_m	மின்புல வீச்சு
eV	எலெக்ட்ரான் வோல்ட்
L	மின்நிலைமம்
keV	கிலோ எலெக்ட்ரான் வோல்ட்
MeV	மில்லியன் எலெக்ட்ரான் வோல்ட்
BeV	பில்லியன் எலெக்ட்ரான் வோல்ட்

1. அறிமுகம்

1.1. முன்னுரை

உலக வரலாற்றில் இந்த நூற்றுண்டு சிறந்ததொரு இடம் பெற்றிருப்பதனைக் காண்கிறோம். மக்கள் நல்வாழ்விற்கு வேண்டிய பல சாதனங்கள் உருவாகியுள்ளன. இவ் வளர்ச்சிகளெல்லாம் அறிவியலும் (*Science*) தொழிலியலும் (*Technology*) இணைந்து ஆற்றிய சாதனைகளாகும். அறிவியலை ஒரு பேராற்றிற்கு ஒப்பிடலாம். அப் பேராற்றில் பலதுறைகள் ஆங்காங்கு விளங்குகின்றன. அவற்றுள் இயற்பியல் (*Physics*) என்பதும் ஒரு துறையாகும். நெடுங்காலமாக வளர்ந்துவரும் இத் துறையில் இயற்கையினைப்பற்றி ஓதப்படும். இயற்கையின் பாற்பட்டபொருள் (*Matter*), ஆற்றல் (*Energy*), இடம் (*Space*), காலம் (*Time*) முதலிய பற்றிய நுட்பங்கள், அவற்றிற் கிடையேயுள்ள தொடர்புகள், அவை காட்டும் வளர்ச்சிகள், அவ் வளர்ச்சிகள் அளிக்கும் பயன்கள் ஆகியவைபற்றி ஆயப்பெறும். இத்தகைய பெருந்துறையைச் சார்ந்ததொரு துறை அணுவியல் (*Atomic Physics*) எனப்படும். இந்த நூற்றுண்டோடு பிறந்த இந்த அணுவியல் ஐம்பது ஆண்டுகளாக விரைந்து வளர்ந்து எழில் கொழிக்கிறது. உலகத்துப் பல்கலைக்கழகங்களெலாம் இதன் சிறப்பினை உணர்ந்து இதனைப் போற்றி வளர்க்கின்றன. இதற்கென அமைந்த ஆய்வரங்கங்களும் (*Research Laboratories*) இதன் நுட்பங்களைக் கண்டு மகிழ்கின்றன. இவ்வாறு பல சிறப்புகளுக்கும் காரணமாய் அமைந்த அணுவியல் ஆய்வுகளில் பயன்படும் கருவிகள் பலவுண்டு. அக் கருவிகள் நுட்பமும் சிறப்பும் பொருந்தியவை. அத்தகைய சிறப்புக் கருவிகளுள் துகள் முடுக்கும் பொறிகள் (*Particle Accelerators*) மிகச் சிறந்த இடம் வகிக்கின்றன. மீச்சிறு துகள்களை முடுக்கப் பயன்படும் இப் பொறிகளைப்பற்றி இந் நூலில் பேசப்படும்.

1.2. அணுவியல்

துகள் முடுக்கும் பொறிகள் பலவகைப்படும். அவைபற்றிய தத்துவங்கள், அமைப்புகள், சிறப்புகள் அவை ஆற்றும் பணிகள் ஆகிய பல செய்திகளையும் பற்றிய அறிமுகத்திற்கு முன்னுரையாக, அத் துகள்களை வாரிவழங்கும் வள்ளல்களாம் அணுக்களைப் பற்றி வரைவது சிறிது பொருத்தமாகும்.

உலகத்துப் பொருள்களெல்லாம் அணுக்களின் கூட்டம் என்பது நீண்ட நெடுநாள்களாக நம்பப் பெற்றுவந்த கருத்தாகும். எனினும், அக் கருத்தினைத் தெளிவு செய்த பெருமை இந்த நூற்றாண்டினைச் சாரும் என்று சொன்னால் பிழையாகாது. அணு மிகச் சிறியது என்பதும், இதுகாறும் மனிதன் கண்ட எக்கருவிக்கும் புலப்படாதது என்பதும் அறிவியலாளர்கள் கண்ட முடிவு. அத்தகைய அணுவின் அமைப்போ மிகவும் அருமைப்பாடு உடையது என்பதும் அவர்கள் ஆய்வின் தெளிவு.

தமிழினைப்போல் அணுவிலும் அகமும் உண்டு, புறமும் உண்டு. அணுவின் அகமாகிய உட்பகுதியை நியூக்ளியஸ் (*Nucleus*) என்று ஆங்கிலம் கூறுகிறது. அதனை அறிந்த நாம் அதற்கு அணுக்கரு என்று தெளிவு நோக்கிப் பெயரிடுகிறோம். அணுவின் அகமாகிய கருவைச் சுற்றி அணுவின் புறம் அமைந்துள்ளது. இந்த அணுப் புறத்தில் எலெக்ட்ரான்கள் எனப்படும் துகள்கள் அணி செய்கின்றன. எலெக்ட்ரான் (*Electron*) என்பது அத் துகளைக் குறிக்க எழுந்த முதற்பெயர்; அனைத்துலகச் சொல். அச் சொல்லினை மாற்றாமலும் சிதைக்காமலும் அவ்வாறே கொள்ளுதல் ஏற்புடைத்தாகும்; மொழியாக்கமும் ஆகும். அவ்வண்ணமே ஏனைய சிறப்புச் சொற்களையும் அனைத்துலகச் சொற்களாகக் கொண்டு நாம் வழங்குதல் நன்மை தருவதாகும். நம் இளைஞர்கள் பிறநாட்டு நல்லறிஞர் சாத்திரங்களைத் தமிழில் வடிக்கும்போது அவ்வழியே நல்வழியாகும்.

அணுப்புறத்தில் எலெக்ட்ரான்கள் இயங்குகின்றன. ஹைட்ரஜன் என்ற எளிய அணுவில் ஒரேயொரு எலெக்ட்ரான் சுற்றுகிறது. நம் உயிருக்கு உறுதுணையான ஆக்சிஜனுடைய அணுவில் எட்டு எலெக்ட்ரான்கள் வட்டமிடுகின்றன. யுரேனியம் ஆகிய அரிய அணுவில் தொண்ணூற்றிரண்டு எலெக்ட்ரான்கள் தொண்டு செய்கின்றன. இந்த எலெக்ட்ரான்களெல்லாம் அணுக்கருக்களைக் காவல் புரிந்த வண்ணம் கவின்பணி செய்கின்றன எனக் கூறலாம்.

மேலும், அவற்றிற்கென அமைந்த தடங்களில் (*Orbits*) அணுக் கருவினை வலம் வந்து வந்தனை செய்கின்றன.

அண்டத்தில், கோள்கள் ஆதவனை வலம் வருகின்றன என்பது அறிந்தவொரு செய்தியாகும். அந்தச் சூரிய குடும்பத்தின் அமைப்பினையும் அணுவின் அமைப்பினையும் அணுவியல் அறிஞர்கள் ஒப்பிட்டுப் பேசி மகிழ்கிறார்கள். சிறியதான அணுவிற்கும் பெரியதான சூரிய குடும்பத்திற்கும் இடையே இலங்கும் ஒப்புமையை நோக்கும்போது இயற்கையின் அமைப்புகளிடையே நிலவும் ஒருமைப்பாடு விளங்கும். இத்தகைய ஒருமைப்பாடுகளைப் போற்றுதல் இயற்கையன்னையினை வழிபடுவதாகும். இயற்கை வழிபாட்டில் திளைத்த நாம் இத்தகு சிறப்புகளை அறிவியற் கண்கொண்டு ஆய்ந்து, தெளிந்து பயனுறக் கடமைப்பட்டிருக்கிறோம். அவ்வகையிலேயே வளர்ந்த காரணத்தால் தான் மேலைநாடுகள் அண்மை நூற்றாண்டுகளில் வளம்பெற்றன என்பதனை நினைவிற் கொள்ளவேண்டும். அறிவியல் வளர்ந்து மேலோங்கினால்தான் நாடு வளம் பெற முடியும்.

இனி, அணுவின் அகமாகிய அணுக்கருவினைப் பற்றிக் கூறலாம். அணுக்கருவின் அளவுபற்றிக் கூற வேண்டுமல்லவா? உலகத்திலுள்ள பருப்பொருள்களை அளக்க சென்டிமீட்டர், மீட்டர் முதலிய அலகுகளைப் பொருளின் அளவு நோக்கிப் பயன்படுத்துகிறோம். ஆனால், அணு உலகிற்கு சென்டிமீட்டரும் மீப்பெரிய நீளமாகும். சென்டிமீட்டரில் பத்துக் கோடியில் ஒருபாகம் ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகு (*Angström Unit*) எனப்படும். இச் சிற்றலகு கொண்டு அணுவின் விட்டம் கணிக்கப் பெறும். ஓர் ஆங்ஸ்ட்ராம் நீளத்தின் இலட்சத்தில் ஒரு பங்கு ஃபெர்மி அலகு (*Fermi Unit*) என்று அழைக்கப்படுகிறது. இந்த மீச்சிறு அலகு கொண்டு அணுக்கருவின் விட்டம் பேசப்படும். சிறந்த அறிவியலாளர்களின் நினைவாக இவ் வலகுகளெல்லாம் பெயரிடப் பெற்றன என்று கூறல் வேண்டும். இவ்வாறு மிக நுட்பமான அணுக் கருவினைப் பற்றி அறிஞர்கள் ஏற்கும் வண்ணம் பேசவும், விளக்கவும், பயன்படுத்தவும் இயன்ற வகையில் இயற்பியலானது இன்று ஏற்றமுற விளங்குகிறது.

மீச் சிற்றிடத்தில் அமைந்த அணுக்கருவின் அமைப்பு, பண்பு, சிறப்பு ஆகியவை பற்றிய ஆய்வுகள் இன்றும் நடந்துவருகின்றன. இனியும் தொடர்ந்து நடக்க இருக்கின்றன. யுரேனியத்தின் கருவில் இருநூற்று முப்பத்தெட்டு துகள்கள் இருக்கலாகும். கருவின் விட்டம் ஃபெர்மி கணக்கில் இருக்கும்போது அத்தகு கருவிற்குள் அமைந்த

இத் துகள்களின் விட்டம் எத்துணை சிறியது என்பதற்கு விளக்கம் தேவையில்லை. அத் துகள்கள் இருவகைப்படும். அவை புரோட்டான்கள் (*Protons*) என்றும், நியூட்ரான்கள் (*Neutrons*) என்றும் பெயர்பெறுகின்றன. புரோட்டான்கள் நேர்மின்னூட்டம் (*Positive Charge*) கொண்ட துகள்களாகும். நியூட்ரான்களோ எந்த மின்னூட்டமும் பெறாத துகள்களாகும். இவ்வாறு வேறுபட்ட பண்புகள் உடைய இருவகையான துகள்களால் உருவாகிய அணுக்கரு பற்றிய செய்திகள் நம்மை வியப்பில் ஆழ்த்துகின்றன. அணுக்கருவில் அமைந்த அருமையான கட்டுக்கோப்புகள், ஆங்கு நிகழும் ஆனந்தத் தாண்டவங்கள், அவை காரணமாக உருவாகும் சீரமைப்புகள், அவையளிக்கும் விந்தைக் கதிர்கள் எல்லாம் நம் கருத்துக்குப் பெரு விருந்தளிக்கின்றன. இவ் விருந்தினை உண்ட முதலறிஞர் பெக்குவரெல் (*Becquerel*) எனப் பெயரிய பிரெஞ்சு நாட்டு விஞ்ஞானியாவார். அவரை அடியொற்றிச் சென்று இனியதொரு விருந்தை ஏற்றவர் கியூரி (*Curie*) அம்மையாராவார். ரேடியம் கண்டுபிடித்துப் புகழெய்திய அவ் வம்மையாரைப் பற்றி உலகறியும். அன்று தொடங்கி இன்றுவரையில் அணுக்கருபற்றிய ஆராய்ச்சிகள் வளர்ந்த வண்ணமாய் இருக்கின்றன. இந்த வளர்ச்சியில் துகள் முடுக்கும் பொறிகள் ஆற்றிய பணிகள் பலவுண்டு.

அணுக்கருவின் ஆட்சிக்குட்பட்டு அணுப்புறத்தே அமையும் எலெக்ட்ரான்களும் நமக்குப் பல அருஞ்செய்திகளைப் பகர்கின்றன. மின்னோட்டம் (*Electric Current*) என்பதே எலெக்ட்ரான்களின் ஓட்டமாகும் என்று சொல்லும்போது அவற்றின் சிறப்பு அறியப்படும். இன்றைய நாகரிகமே எலெக்ட்ரான் நாகரிகம் என்று சொல்லிவிடலாம். வேதியியல் (*Chemistry*) எனப்படும் இயைபியல் நிகழ்ச்சிகளெல்லாம் இந்த எலெக்ட்ரானின் நாடகங்களாகும். உயிர்கள் வாழ்வதற்கே இந்த நாடகங்கள் காரணமாய் அமைகின்றன. எலெக்ட்ரான்களை ஆற்றுப்படுத்திச் செயற்கை முறையில் உருவாகியுள்ள சாதனங்களும் கருவிகளும் எண்ணிறந்தவை. இன்றைய தொழில்நுட்ப வளர்ச்சிக்கு அவையெல்லாம் சான்றுகளாகும். மின் விளக்கு, ரேடியோ வால்வு (*Radio Valve*), ஒளிமின்கலம் (*Photo-electric Cell*) முதலிய தனிக் கருவிகளையும் அவற்றின் அடிப்படையில் அமைந்த வானொலியாம் தொலைக்கேள்வி (*Radio*), தொலைக்காட்சி (*Television*) முதலிய சாதனங்களையும், எக்ஸ்கதிர் போன்ற விளைவுகளையும் நாமறிவோம். அலாவுதீன் அற்புத விளக்கில் பேசப்படும் பூதகணங்களைப்போல், இந்த எலெக்ட்ரான்கள் நாம் இடும் பணியினை

ஆற்றக் காத்திருக்கின்றன. எல்லா அணுக்களிலும் இடம்பெறும் இந்த எலெக்ட்ரான்களையும் ஒருமுகப்படுத்தி முடுக்கம் தந்து ஆற்றல் அளிக்கும் துகள் பொறிகளும் அமைக்கப்பெற்றுள்ளன.

துகள்பொறிகள் மின்புலம் (*Electric Field*) கொண்டு மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்களுக்கு ஆற்றல் அளிக்கின்றன. ஆகவே, அணுக்களின் ஆக்கக் கூறுகளாகிய எலெக்ட்ரான்கள், புரோட்டான்கள், அயனிகள் ஆகிய துகள்கள் இவ்வாறு முடுக்கம் பெற்று ஆற்றல்வளம் பெருக்குகின்றன. இத் துகள்கள் பற்றிய ஆய்விலும், இவற்றின் துணைகொண்டு எழும் பல நுட்பமான ஆராய்ச்சிகளிலும், இந்நூற்றுண்டு சிறந்த முன்னேற்றம் கண்டிருக் கிறது. இத் துறை சார்ந்த அறிவியல் வளர்ச்சியில் துகள் முடுக்கும் பொறிகள் உறுதுணையாய் நின்றிருக்கின்றன. இப் பொறிகள் மனிதனின் அறிவு வளர்ச்சிக்கும், அவனுடைய செயல்திறத்திற்கும், துணிவிற்கும், அயராத உழைப்பிற்கும் சான்றுகளாக விளங்கு கின்றன என்று கூறலாம். இவ்வாறு பல்லாற்றுனும் சிறந்த இப் பொறிகளின் வரலாறு பற்றியும், வளர்ச்சி பற்றியும், பண்புகள் பற்றியும், பயன்கள் பற்றியும் இந் நூலில் ஒருவாறு விளக்கப்பெறும்.

1.3. ஆற்றல் துகள்கள்

இந் நூலில் கூறப்படும் பொறிகளின் துணையினுல் முடுக்கம் பெறும் துகள்கள் ஆற்றல் பெறுகின்றன என்று குறிப்பிடும்போது, இயற்கையிலேயே அமையும் சில ஆற்றல் துகள்களைப் பற்றியும் அவற்றின் ஆற்றலைப் பற்றியும் கூறுதல் பொருத்தமாகும். துகள் களின் ஆற்றலை அளந்து கூறுவதற்குப் பயன்படும் ஆற்றல் அலகு எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு (*Electron Volt*) எனப்படும். ஓர் எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆற்றல் என்பது $1{\cdot}6\times10^{-12}$ எர்க்குக்குச் (*Erg*) சமமாகும். சிறிய துகளின் ஆற்றலைச் சிறியதோர் அலகு கொண்டு தானே அளக்க முடியும்? பின்வரும் அட்டவணையில் நீர் மூலகத்தின் இயக்க ஆற்றல், வாயு மூலகத்தின் இயக்க ஆற்றல், கரியணு ஆக்சிஜன் அணுக்களோடு இணைந்து கரியமில வாயு விளையும் போது தேவைப்படும் ஆற்றல், கட்புலனுகும் ஒளியினை உருவாக்கும் ஃபோட்டான்களின் (*Photons*) ஆற்றல், இவை போன்ற பிற துகள் களின் ஆற்றலின் தோராய மதிப்புகள் வகைப்படுத்தப்பட்டிருப் பதனைப் பார்க்கலாம்.

அட்டவணை 1·1.

வ. எண்	ஆற்றல் துகள்	ஒரு துகளின் ஆற்றல்
1.	நீர் மூலகத்தின் இயக்க ஆற்றல் (திருக்குற்றால அருவி)	0·0002 *eV*
2.	காற்று மூலகத்தின் இயக்க ஆற்றல் (மெரீனா கடற்கரை)	0·02 *eV*
3.	கரியணு கரியமில வாயுவாக மாறுதலுக்குரிய ஆற்றல்	4·0 *eV*
4.	சூரிய ஒளியிலுள்ள ஃபோட்டானின் ஆற்றல்	2·0 *eV*
5.	புற ஊதாக் கதிரிலுள்ள ,, ,, (*Ultra violet ray*)	3·0 முதல் 100 *eV* வரை
6.	வன் எக்ஸ் கதிரிலுள்ள ,, ,, (*Hard X-ray*)	0·1 முதல் 1 *MeV* வரை
7.	காமாக் கதிரிலுள்ள ,, ,, (*Gamma Ray*)	1 முதல் 3 *MeV* வரை
8.	ரேடியச் சிதைவு ஆற்றல் (*Radium Disintegration*)	5 *MeV*
9.	யுரேனியப் பிளவை ஆற்றல்	200 *MeV*
10.	காஸ்மிக் கதிர்த் துகள் ஆற்றல்	1 முதல் 10 *BeV* வரை

இங்கு *eV* என்பது எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு என்னும் ஆற்றல் அலகினையும், *MeV* என்பது மில்லியன் எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகளையும், *BeV* என்பது ஆயிரம் மில்லியன் (பில்லியன்) எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டுகளையும் குறிப்பன ஆகும். துகள் முடுக்கும் பொறிகளின் துணையினால் துகளின் ஆற்றலை அதிகப்படுத்துவதில் மனிதன் இயற்கையோடு போட்டியிட்டு வெற்றி காண்கிறான். மில்லியன் எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு அளிக்கும் பொறிகள் நாற்பது ஆண்டுகளுக்கு முன்னர் அமைக்கப்பட்டன. ஒரு சில பில்லியன் எலெக்ட்ரான் வோல்ட்டு அளிக்கும் பொறிகள் இருபது ஆண்டுகளுக்கு முன்னர் நிறுவப்பெற்றன.

இந்த நூற்றாண்டின் தொடக்கத்தில் காஸ்மிக் கதிர்கள் (*Cosmic Rays*) எனப்படும் அண்டக் கதிர்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. அவைபற்றிய ஆய்வுகள் உலகெங்கும் மலைமீதும் கடல் ஆழத்திலும் நடந்த வண்ணம் உள்ளன. இயற்கையாகவே பல்வகையான ஆற்றல் வாய்ந்த துகள்கள் புவியின்மீது மழையெனப் பொழியப்படுகின்றன. ஆற்றல் மிக்க அக் கதிர்களில் ஒரு பகுதியளவே நம்மை வந்தடைகின்றன. பலூன்கள் கொண்டும் ராக்கெட்டுகள் கொண்டும் அவற்றை ஆராய்கிறார்கள். மாறாக, அக் கதிர்களில் காணப்பெறும் துகள்களைப்பற்றி நாம் செவ்விய முறையில் ஆராய்ந்தறிய வேண்டுமானால், துகள் முடுக்கும் பொறிகளின் துணை நமக்கு வேண்டும். எனவே, 100 *BeV* பொறிகள் நிறுவும் வகையில் அறிவியலாளர்கள் இன்று முயன்று வருகிறார்கள்.

1.4. துகள் பொறிகள்

துகள் பொறிகள் பற்றிய வரலாறு மிகவும் சுவைமிக்கதொன்றாகும். அட்டவணை 1.2-ல் அவற்றைப் பற்றிய குறிப்புகளைக் காணலாம். சிறந்த பல கருத்துகள் முகிழ்த்து வெவ்வேறு வகையான பொறிகள் உருவாகி வளர்ந்திருப்பதனைக் காண்கிறோம். வாண்டி கிராஃப் (*Van de Graff*), காக்ராஃப்ட்,வால்ட்டன் (*Cockroft, Walton* 1932), லாரென்ஸ் (*Lawrence* 1929), கெர்ஸ்ட் (*Kerst* 1940), வெக்ஸ்லர், மாக்மில்லன் (*Veksler, McMillan* 1946), குரான்ட் (*Courant*), லிவிங்ஸ்டன் (*Livingston*), ஸ்னைடர் (*Snyder* 1952), முதலிய சிந்தனைச் சிற்பிகளின் கருத்தோவியங்களின் விளக்கங்களாகவே துகள் பொறிகளின் பல தலைமுறைகள் தோன்றி வந்திருக்கின்றன.

அட்டவணை 1.2.
துகள் பொறிகள்பற்றிய சிறப்புக் குறிப்புகள்

வ. எண்.	பொறி	துகள்	மின்புலம் (*E*)	காந்தப் புலம் (*B*)	துகள் தடம்	ஆற்றல்
1.	வாண்டி கிராஃப் பொறி	e, p, d, a	மாறிலி	இல்லை	நேர்த் தடம்	12 *MeV*
2.	காக்ராஃப்ட் வால்டன் பொறி	e, p, d, a	மாறிலி	இல்லை	நேர்த் தடம்	4 *MeV*
3.	நேரியல் முடுக்கி	p, d	$\omega_{rf} \approx$ 200 மெகா. சைக்கி./செ.	இல்லை	நேர்த் தடம்	30 *MeV*
4.	நேரியல் முடுக்கி	e	$\omega_{rf} \approx$ 3,000 மெகா. சைக்கி./செ.	இல்லை	நேர்த் தடம்	1 *BeV*
5.	சைக்ளோட்ரான்	p, d, a	ω_{rf} - மாறிலி	மாறிலி	சுருள் தடம்	25 *MeV*
6.	சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான்	d	ω_{rf} - மாறவல்லது	மாறிலி	சுருள் தடம்	700 *MeV*
7.	பீட்டாட்ரான்	e	இல்லை	மாறவல்லது	வட்டத் தடம்	300 *MeV*
8.	எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான்	e	ω_{rf} - மாறிலி	மாறவல்லது	வட்டத் தடம்	1 *BeV*
9.	புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரான்	p	ω_{rf} - மாறவல்லது	மாறவல்லது	வட்டத் தடம்	10 *BeV*
10.	A. G. சிங்க்ரோட்ரான்	p	ω_{rf} - மாறவல்லது	மாறவல்லது	வட்டத் தடம்	30 *BeV*

e-எலக்ட்ரான் ; p–புரோட்டான் ; d-டாய்ட்ரான் (*Deutron*) ; a-ஆல்ஃபாத் துகள் ; ω_{rf}-மின்புலக் கோண அதிர்வெண்

ஒவ்வொரு தலைமுறையும் ஒவ்வொரு வகையில் தலைசிறந்து விளங்குகின்றது என்று கூறவேண்டும். சிறப்பாக, லாரென்ஸ் என்னும் பெயர்பெற்ற பேராசிரியரின் பணி சிறந்த முன்னேற்றத் திற்குத் தோற்றுவாயாக அமைந்தது. அவர் அமைத்த துகள் பொறி சைக்ளோட்ரான் (*Cyclotron*) என்னும் பெயர் வாய்ந்தது. மின்புலத்தால் மின்னூட்டமுடைய துகளை முடுக்கலாம் என்பது யாவரும் அறிந்திருந்த கருத்து என்பதில் ஐயமில்லை. அதுமட்டும் கொண்டு ஆற்றல் சிறந்த பொறியினை அமைக்க முடியவில்லை. காந்தப்புலத்தின் துணையினால் மின்னூட்டமுடைய துகளை மீண்டும் மீண்டும் அலையும் மின்புலத்தில் ஆற்றல் ஏற்கும்படி வழிப்படுத்துதல் கூடும் என்று அறிவாற் கண்டு கூறிய பெருமை அவரைச் சாரும். இவ்வாறு சிறந்ததொரு கருத்துக் கனவு கண்டது மட்டுமன்று; அக் கருத்தினைச் செயற்பாட்டிற்குக் கொண்டுவந்து அரியதொரு துகள் பொறியினை அமைத்துத் தந்த முதல் முயற்சியும் அவரையே சாரும். அப் பொறியினை வளர்ப்பதிலேயே தம் வாழ்நாளையெல்லாம் செலவிட்டு, அறிவியலாளர்களுக் கெல்லாம் வழிகாட்டியாக லாரென்ஸ் விளங்கினார். அவர் கண்ட கனவின் விளக்கமே துகள் பொறிகளின் வரலாறு என்று கூறுவதும் பொருந்தும். ஆகவே, அவர் நிறுவிய நற்பொறி 'கனவு தந்த பொறிகள்' என்ற தலைப்பில் இந் நூலில் பேசப்பெறும். இவ்வாறே ஒவ்வொருவகைப் பொறியும் இந்நூலில் சிறந்த விளக்கம் பெறும்.

1.5. பல்துறை ஒத்துழைப்பு

துகள் பொறிகள் அமைப்பில் பங்கு பெறும் அறிவியலாளர்கள் பல அறிவியல் துறைகளையும் சார்ந்தவராவர். மின்னூட்டங் கொண்ட துகள்களை வேண்டியாங்கு வேண்டிய திசைகளில், வேண்டிய வேகங்களில் வழிப்படுத்துவதே இப் பொறிகளின் பணியாகும். ஆகவே, முதலாவதாக மின் பொறியியல் பற்றிய அனுபவம் பயன்படு கின்றது. பேராற்றல் பொறிகளில் மிகவுயர்ந்த மின்னழுத்தங்கள் செயற்படுகின்றன. அத்தகைய மின்னழுத்தங்களை ஆட்சி செய்வது எளிதன்று. பெஞ்சமின் ஃபிராங்கிளின் முதல் இன்றைய மின்பொறி யாளர்கள் வரையில் வந்த இத் துறை சார்ந்த அறிவியலாளர்களின் நுட்ப அறிவு இங்குப் பயன்படுகின்றது. மின்னூட்டத்தால் சிறந்த எண்ணிறந்த துகள்களை ஒரு பொறியினில் வழிப்படுத்த முற்படும் போது, அங்குக் காற்று அகற்றப்பெற்று வெற்றிடம் உருவாக வேண்டும். எனவே, முடுக்கும் பொறிகளில் மிக உயர்ந்த வெற்றிடம் அமைய வேண்டிய காரணத்தால், வெற்றிடத்தை உருவாக்கும் பம்புகளும் (*Pumps*) தேவைப்படுகின்றன. இத் துறையில் தலைசிறந்த முன்னேற்றங்கள் கண்டிருக்கிறோம். 10^{-10} செ.மீ. பாதரச

அழுத்தம் என்ற அளவில் உயர்ந்த வெற்றிடத்தை உருவாக்குதல் இன்று எளிதாகிவிட்டது. டைட்டேனியம் பம்பு போன்ற சிறந்த காற்றிறைக்கும் கருவிகள் இன்று உறுதுணையாக நின்று உதவுகின்றன. இத்தகைய வெற்றிடங்களை உருவாக்கியதோடு அமையாது அவை மாசு பெறாது நீண்ட கால அளவிற்குக் காக்கப் பெறவும் வேண்டும். மேலும், இவ்விதச் செயல்முறைகளை ஏற்கவல்ல சிறப்புப் பொருள் கொண்டு பொறியின் பகுதிகள் அமைக்கப்பெறுதல் வேண்டும். எனவே, இத் துறைகளில் சிறந்த தேர்ச்சி பெற்ற வல்லுநர்களின் அறிவும் இங்குப் பயன்படுகின்றது.

துகள்கள் மின்புலத்தால் முடுக்கப்பெறுகின்றன. ஆதலால், உகந்த அலையும் மின்புலம் (*Oscillating Electric Field*) அமைக்கப் படவேண்டும். எலெக்ட்ரானியல் (*Electronics*) அறிஞர்கள் பல்லாண்டுகளாகக் கண்டறிந்த விளக்கங்கள், முறைகள், செயற் பாட்டுநிலைகள் ஆகியவை இன்றியமையாதனவாகப் பயன்படு கின்றன. இரண்டாம் உலகப்போர்க் காலத்தில் ரேடியோ, ராடார் (*Radār*) முதலிய துறைகளில் மின்னியற் கருவிகள் மிக மேம்பாடு அடைந்தன. கிளைஸ்ட்ரான், மாக்னெட்ரான் முதலிய சிறப்புக் கருவிகள் தோன்றின. இவைபற்றிய அநுபவம் எல்லாம் துகள் பொறிகள் பற்றிய துணைக் கருவிகளில் பயன்பட்டது. தவிர, வலிமை வாய்ந்ததும், சிறப்பு அமைப்புகள் கொண்டதுமான பெரிய காந்தங்கள் பொறிகளில் துகள்களை வழிப்படுத்துகின்றன. அத்தகைய காந்தங்களை நிறுவுதல் எளிதன்று. எனவே, காந்தவியல் நிபுணர் களும் தங்களுடைய சிறப்பு அறிவை இங்கு நல்க வேண்டியிருக்கிறது.

ஆய்வரங்க மேசையொன்றில் அமைக்கப்பெறும் சிறியதொரு முடுக்கி முதல், பல கிலோமீட்டர்கள் சுற்றளவுள்ள பெருநிலப் பரப்பில் நிறுவப்படும் பேராற்றல் முடுக்கி வரையில் பலவகையான முடுக்கும் பொறிகள் அமைக்கப்பெற்றுள்ளன. அத்தகைய பெரு முயற்சிகளில் முன்னோடியாகப் பயன்படும் கணக்கிடும் பொறிகளின் (*Computers*) பணிகளும் சிறந்தவையாகும். ஆகவே, முடுக்கும் பொறிகள் அமைப்பில் பெரும்பாலான அறிவியல் துறைகளும் பங்கு பெறுகின்றன என்று கூறவேண்டும்.

இந்த நூற்றாண்டு அறிவியல் வளர்ச்சியின் ஒரு சிறப்பு, பல்துறை அறிஞர்களும், ஒரே தலைமையின்கீழ் அவரவர் நிலைகளில் பொறுப் பேற்று ஒருமுகமாகப் பணி செய்வதாகும். இவ்வகையிலும் துகள் பொறிகள் பற்றிய துறையில் அரிய சாதனைகளைக் காண்கிறோம். ஆகவே, பேராற்றல் துகள்களைப் பற்றிய ஆய்விற்குப் பயன்படும் அணுப்பொறிகளின் மேன்மை நன்கு புலப்படும்.

1.6. பொறிகளும் பணிகளும்

அணுவியலில் துகள் பொறிகள் பல நற்பணிகள் ஆற்றி வந்துள்ளன. சென்ற நாற்பது ஆண்டுகளாக ஏற்பட்டுள்ள துகள் பொறிகள் முன்னேற்றமே அணுவியலின் முன்னேற்றம் என்னும் அளவிற்கு இப் பொறிகள் வளர்ந்துள்ளன. கட்புலனுக்கும் கருவித் துணைகளுக்கும் தெளிவு பெருத மீச்சிறு துகள்களைப் பற்றிய அறிவியலில், கொள்கை சார்ந்த விளக்கங்கள் (*Theoretical Considerations*) முதலிடம் பெறுகின்றன. அவ் விளக்கங்கள் காட்டும் முடிவுகளைச் சோதனைமூலம் கண்டு தெளிவதென்ருல் துகள் பொறிகளும், அணு உலைகளும் (*Nuclear Reactors*) மிகவும் தேவைப் படுகின்றன. சென்ற நாற்பது ஆண்டுகளில் பெரும்பான்மையான இயற்பியல் நோபெல் பரிசுகள், அணுவியலும் துகள் பொறியியலும் சார்ந்த அறிவியலாளர்களுக்கே கிடைத்திருக்கின்றன என்பதைக் காணும்போது துகள் பொறிகளின் பணிகள் நன்கு விளங்கும்.

இயற்பியல் ஆய்வுகள், இயற்கையின் ஒருமைப்பாடு, இயற்கையின் சிறப்புகள் ஆகியவை மட்டுமன்றி, பிற துறைகளிலும் துகள் பொறி-கள் சிறந்த பணிகள் ஆற்றி வருகின்றன என்று கூறவேண்டும். மிகவும் வன்மைமிக்க எக்ஸ் கதிர்களை உருவாக்குதல், உணவுப் பொருள்களைப் பாதுகாத்தல், பிளாஸ்டிக் பொருள்களை உருவாக்குதல், உடல்நல இயற்பியல், நுண்ணிடப் புற்றுநோய் நீக்குதல் முதலிய சிறப்புப் பணிகளிலும் துகள் பொறிகள் பணிகள் செய்து புகழ் எய்தியுள்ளன. எதிர்காலத்தில், பேராற்றல் கொண்ட துகள்களை வழங்கும் துகள் பொறிகளின் துணையினுல் அரிய பல முன்னேற்றங்கள் காத்திருக் கின்றன. ஆகவே, பெருமைமிக்க இப் பொறிகளைப்பற்றி நாம் அறிய வேண்டிய செய்திகள் பல உள்ளன என்பதை உணர்கிருேம்.

1.7. முடிவுரை

இதுகாறும் கூறியவற்ருல், இயற்பியல் என்னும் அறிவுத்துறையில் அணுவியல் துறையானது இருபதாம் நூற்ருண்டில் வளர்ந்த பகுதி என்றும், அந்த அணுவியல் துறையில் புரோட்டான்கள், எலெக்ட்ரான்கள் முதலிய சிறந்த துகள்கள் துகள் பொறிகள் வாயிலாகப் பேராற்றல் பெறக்கூடும் என்றும், அத்தகைய பொறிகள் அரும்பணிகள் பல ஆற்றுகின்றன என்றும், அப் பொறிகளை உருவாக்குவதில் பல்துறை அறிவியலாளர்களும் பங்கு பெறுகின்றனர் என்றும், அவ்வகைப் பொறிகள் பற்றிய செய்திகள் அறிவுக்கு விருந்தாய் அமைகின்றன என்றும் தெளிவாகும்.

அணுவியல் சார்ந்த துகள் பொறிகள் பற்றிய இந் நூலில் பத்து அத்தியாயங்கள் உள்ளன. முதலில் அமைந்த இந்த அத்தியாயம் நூலிற்கு அறிமுகமாய் அமைகின்றது. இந் நூலில் விளக்கப்பெறும் பொறிகள் பற்றி எழுந்த தலைமை சான்ற ஆய்வுரைகளைப் பற்றிய சுருக்கவுரை இரண்டாம் அத்தியாயத்தில் இடம்பெறும். இந்த அணுப் பொறிகளுக்கெல்லாம் ஆதியாய் அமைந்து, இவற்றை வளர்த்த முதற்பொறிகளைப் பற்றி மூன்ரும் அத்தியாயத்தில் கூறப்படும். அடுத்த அத்தியாயத்தில் 'நேரியல் பொறிகள்' (*Linear Accelerators*) என்ற பொறிகளைப் பற்றியும், அவை இரு வகைப்படும் என்பது பற்றியும், அவற்றின் சிறப்புகள் பற்றியும் நவிலப்படும். ஐந்தாம் அத்தியாயத்தில் லாரென்ஸ் கண்ட 'கனவு தந்த பொறிகள்' பற்றிய உரை வழங்கப்படும். மனிதனின் முயற்சி களெல்லாம் ஓரளவிற்குக் கட்டுப்பட்டவை என்றும், ஆயினும் அறிவு கொண்டு அம் முயற்சிகள் தொடரப்பட வேண்டும் என்றும், அவ் வகையில் வெற்றி உறுதி என்றும் எண்ணுமாப்போல ஆரும் அத்தி யாயம் அமைகின்றது. அங்கு, 'கருத்தூர்ந்த பொறிகள்' என்ற தலைப்பில், சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான்கள் (*Synchro Cyclotrons*) பற்றிய சிறப்புரை காணப்படும். தொடர்ந்து ஏழாம் அத்தியாயத்தில் பீட்டாட்ரான்கள் (*Betatrons*) எனப்படும் எலெக்ட்ரான் முடுக்கிகள் பற்றிய எழிற் சிறப்புகளை 'எழிலார்ந்த பொறிகள்' என்ற தலைப்பில் காணலாம். இனி 'ஏற்றமிகு பொறிகள்' என்ற பெயரில் விளக்கம் பெறுவன சிங்க்ரோட்டான்கள் (*Synchrotrons*) எனப் பெயரிய உயராற்றல் பொறிகளாகும். அடுத்ததாக ஒன்பதாம் அத்தியாயத் தில் 'அரும்பொறிகள்' என்ற அமைப்பில், இதுவரையில் காணப் பெற்றவைகளுள் பேராற்றல் முடுக்கிகளான 'இரு வாட்டந்தரு பொறிகள்' (*Alternate Gradient Synchrotrons*) பற்றிய விரிவுரையும், அவை பற்றிய பயன்களும் பகரப்படும். இறுதியாகப் பத்தாம் அத்தியாயத்தில் 'பொறிகளும் புதுமைகளும்' என்ற வகையில், இந் நூலிற் காணப்பட்ட பொறிகளைப் பற்றிய முடிவுரைகளும், இப் பொறிகள் கூறும் அணுவியற் புதுமைகளும், இவை பயக்கும் பல்துறைப் பயன்கள் பற்றிய சுருக்கமான குறிப்புரைகளும் கூறப் பெற்று இந் நூல் நிறைவு பெறும்.

2. ஆய்வுரை விளக்கங்கள்

2.1. முன்னுரை

முதல் அத்தியாயத்தில் கூறப்பட்டபடி பலவகையான துகள் முடுக்கும் பொறிகள் அணு இயற்பியலில் பயன்பட்டு வருகின்றன. அத்தகு துகள் பொறிகள் பிறந்த வரலாறு சுவைமிக்க தொன்ருகும். தவிர ஒவ்வொரு வகையான துகள் பொறி அமைப்பதற்கு முன்பாக, அதுபற்றிய கருத்துகள் செவ்விய முறையில் தெளிவாக்கப் பெற்றன என்பதையும் குறிப்பிட வேண்டும். அத்தகு புதுப்புது முயற்சிகளில் எல்லாம், கணக்கியல் சிறந்த வழிகாட்டியாக விளங்கி வந்திருப்பதைக் காண்கிரேம். ஆகவே, தனித்தனித் துகள் பொறிகளைப் பற்றிப் பேசுவதற்கு முன்பாக அவைபற்றிய சிறந்த பொதுக் கருத்துகளை இயற்பியல் அறிஞர்கள் ஆய்வு செய்து தெளிவு செய்தார்கள். அத்தகைய விளக்கங்கள் குறித்து ஒரு சிறிது இந்த அத்தியாயத்தில் காண்போம்.

துகள்களின் இயக்கம் பற்றிய கருத்துரைகளுள் சிறப்பிடம் பெறுவது சார்பியல் கொள்கையாகும். இக்கொள்கையின்படி துகளின் உச்ச வேகம் ஒளியின் வேகமாகும். ஆனல், சாதாரண வேகங்களில் ஒரு துகளின் இயக்கம் வேகத்தால் பாதிக்கப்படுவதில்லை. துகள் முடுக்கிகளிலோ துகள்கள் பெருவேகத்துடன் இயங்க நேரிடுமாதலால், அவற்றின் இயக்கம் பற்றிய கருத்துரைகள் சார்பியல் கொள்கையின் அடிப்படையில் நிறுவப்பட வேண்டும்.

துகள்கள் பொறிகளில் இயங்கும்போது காந்தப் புலமொன்ருல் வழிப்படுத்தப்படும். இந்தக் காந்தப்புலமோ பொறிக்குத் தக்கவாறு அமைப்பில் பலவகை மாற்றங்கள் பெறும். ஆகவே, காந்தப் புலத்தை அமைப்பதிலும் கணித இயல் ஆய்வுகள் பேருதவி புரிகின்றன.

பொறிகளில் துகள் முடுக்கப்படும்போது அது இயங்கும் தடமானது எந்தவிதப் பிறழ்ச்சிகளாலும் நிலைகெடாமல் நிலைப்பாடு (*Stability*) பெறவேண்டும். இந்த நிலைப்பாட்டினை ஆய்வதற்கும் கணக்கியல் பயன்பட்டு, ஆயத்திசை (*Axial Direction*), ஆரத்திசை (*Radial Direction*) ஆகிய இரு திசைகளிலும் நிலைப்பாட்டிற்கான விதியையும் பெற உதவும்.

பல்லாயிரக் கணக்கான துகள்கள் கூட்டமாகச் செல்லும்போது அவற்றிற்கிடையே எழும் கலைக்கோண வேறுபாடுகள் பெரிதும் இடர் தரும். இந்த இடர்களையெல்லாம் தவிர்த்துக் கலைக்கோண நிலைப் பாடு உருவாக்கப் பெறல் வேண்டும்.

எனவே, ஆய்வுரை விளக்கங்கள் என்ற தலைப்புடைய இந்த அத்தியாயத்தில் சார்பியல் கொள்கைதரும் விளக்கங்கள், பீட்டாட் ரான் அலைவுகள் பற்றிய விளக்கங்கள், கலைக்கோண அலைவுகள் பற்றிய விளக்கங்கள் ஆகிய கருத்துகள் தெளிவாக்கப்பட்டுத் துகளின் இயக்கம் செம்மை பெறுவதற்கான கருத்துகள் தெளிவு செய்யப்படும்.

2.2. சார்பியல் கொள்கையும் துகளின் இயக்கமும்

இயக்கவியலில் வேகம் பற்றிய முக்கியமான கருத்துகள் வழங்கி வருகின்றன. முதுபழங் கொள்கையில் (*Classical Theory*) நியூட்டன் அளித்த கருத்துகள் அரசோச்சுகின்றன. அக் கொள்கையின்படி துகளின் நிறையானது வேகத்தால் மாறுபடாது. இந்தக் கருத்து இன்றைய இயற்பியலில் மாற்றம் பெற்றுவிட்டது. இந்த மாற்றம் உருவாகக் காரணமானவர் ஐன்ஸ்டீன் என்னும் பெயர் பெற்ற கலைமாச் செல்வர் ஆவர். உலகிற்கு அவர் அளித்த ஒப்பரிய பெருஞ் செல்வம் சார்பியல் கொள்கை (*Theory of Relativity*) என்னும் சிறந்த கொள்கையாகும். இந்தக் கொள்கையின்படி, ஒரு துகளின் நிறையானது வேகத்திற்குத் தக்கவாறு வேறுபடும். ஒரு துகள் ஓய்வில் (*rest*) இருக்கும்போது அதன் நிறை M_0 என்றும், v வேகத் துடன் இயங்கும் போது அதன் நிறை M என்றும், ஒளியின் வேகம் c என்றும் குறிக்கப்பெறுமானுல் இவற்றை $M = \frac{M_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ என்ற தொடர்பால் இணைக்கலாம்.

ஒளியின் வேகம் விஞடிக்கு 3×10^5 கிலோ மீட்டர்கள் ஆகும். இவ் வேகம் நாம் அன்றுட வாழ்வில் காணும் சாதாரண வேகங்களை விட மிகமிக அதிகமானதாகும். எனவே $\frac{v}{c}$ என்னும் தகவு சாதா

ரணமாக மிகச் சிறிய மதிப்பையே ஏற்கும். இத்தகு சிறு மதிப்புக் காரணமாக நாம் காணும் சாதாரண இயக்கங்கள் பற்றிய அறிவியலில், சார்பியல் கொள்கையின் விளைவுகள், புறக்கணிக்கத்தக்க அளவிலேயே அமைந்து விடுகின்றன. இதனைப் பின்வரும் அட்டவணையிலிருந்து அறியலாம்.

அட்டவணை 2.1.

திசைவேகம் v (கி.மீ/மணி)	ஓய்வுநிலை நிறை (M_0)	இயக்கநிலை நிறை (M)	இயக்கநிலை நிறை / ஓய்வு நிலை நிறை
0	M_0	M_0	1
10^5	M_0	$\approx 1{\cdot}000000M_0$	1·000000
10^7	M_0	$1{\cdot}000043M_0$	1·000043
10^8	M_0	$1{\cdot}004314M_0$	1·004314
$1{\cdot}08\times10^8$ (எலெக்ட்ரான்)	M_0	$1{\cdot}005038M_0$	1·005038
10^9	M_0	$2{\cdot}647568M_0$	2·647568
....	....	....	....
....	....	....	....
....	....	....	....
$1{\cdot}05\times10^9$	M_0	$4{\cdot}272420M_0$	4·272420

இந்த அட்டவணையிலிருந்து துகளின் ஆற்றல் அதிகரிக்க அதிகரிக்க அதன் நிறை அதிகரிக்கும் என்பது தெளிவாகும்.

முடுக்கும் பொறிகளில் துகள்கள் அதிவேகமாக இயங்குவதால் அவை பற்றிய ஆய்வில் சார்பியல் கொள்கையை மனத்திற் கொள்ள வேண்டும். ஐன்ஸ்டீனின் கொள்கைப்படி ஒரு துகளின் நிறையும் ஆற்றலும் நெருங்கிய தொடர்புடையன. அத் துகளின் ஓய்வுநிலை ஆற்றல் (*Rest Energy*) E_0 எனில்,

$$E_0 = M_0c^2 \tag{2.1}$$

என்றும், இயக்கநிலை ஆற்றல் $E = Mc^2$ (2.2)

என்றும் ஆகும்.

எனவே, இயக்கம் தோற்றுவிக்கும் இயக்க ஆற்றல்,

$$T = E - E_0$$

அல்லது,
$$T = Mc^2 - M_0c^2$$

ஆகும். எனவே
$$M = \left(M_0 + \frac{T}{c^2}\right) \tag{2.3}$$

துகளின் நிறை இயக்க ஆற்றலுக்குத் தக்கவாறு மாறுபடும் என்பதைத் தொடர்பு 2.3 விளக்கும்.

அடுத்து, முடுக்கும் பொறிகளின் ஆய்வில் உந்தம் என்னும் கருத்து சிறப்பிடம் வகிக்கின்றது. உந்தம் = நிறை × திசைவேகம் என்பதனை அறிவோம். இதனைக் குறியீடுகளால் குறிப்போமானல்,

$$P = Mv$$

ஆகும். எனவே விசை

$$F = \frac{d}{dt}(p)$$

$$= \frac{d}{dt}(Mv) \qquad (2.4)$$

எனப் பெறலாம். துகள் ஒன்று F என்ற விசையினுல் ds தூரம் செல்லுவதால் செய்யப்பட்ட வேலை Fds ஆகும். செய்யப்பட்ட வேலை இயக்க ஆற்றலில் ஏற்பட்ட மாற்றத்திற்குச் சமம்.

$$\therefore\ Fds = dT$$

இயக்க ஆற்றலில் ஏற்படும் மாற்றத்தால் மொத்த ஆற்றலும் மாற்றம் பெறும்.

எனவே,

$$Fds = dE$$

எனலாம்.

$$\therefore\ F\frac{ds}{dt} = \frac{dE}{dt}$$

ஆகும்.

அல்லது,

$$Fv = \frac{dE}{dt} \qquad (2.5)$$

ஆகும். சமன் 2·4 – லிருந்து

$$v\frac{dp}{dt} = \frac{dE}{dt}$$

இச் சமனை M – ஆல் பெருக்க,

$$Mv\frac{dp}{dt} = M\frac{dE}{dt}$$

எனப் பெறலாம். அல்லது

$$p\frac{dp}{dt} = \frac{E}{c^2}\ \frac{dE}{dt} \qquad (2.6)$$

தொகுதி (*Integration*) காணில் $\int_0^p p\ dp = \int_{E_0}^{E} \frac{E}{c^2}\ dE$

$$= \frac{1}{c^2} \int_{E_0}^{E} E\ dE$$

$$\therefore\ \frac{p^2}{2} = \frac{1}{2c^2}\ (E^2 - E_0^2)$$

ஆகவே $$p = \frac{1}{c} \sqrt{(E^2 - E_0^2)} \qquad (2.7)$$

$$\therefore\ p = \frac{1}{c} \sqrt{T\,(2E_0 + T)} \qquad (2.8)$$

இச் சமன்பாட்டிலிருந்து ஒரு துகளின் சார்பியல் உந்தம் அதன் இயக்க ஆற்றலோடு எவ்வகையில் தொடர்பு பெற்றுள்ளது என்பதனைக் காண்கிறோம்.

இனி, துகளின் வேகத்திற்கும் ஒளியின் வேகத்திற்கும் உள்ள தொடர்பைப் பெறலாம்.

சமன் 2.7 - லிருந்து, திசைவேகம்,

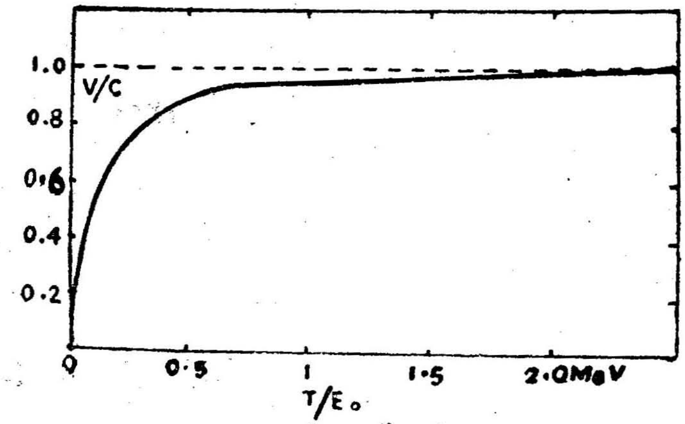
$$v = \frac{1}{Mc}\sqrt{(E^2 - E_0^2)}$$

$$= \frac{c}{E}\ \sqrt{(E^2 - E_0^2)}$$

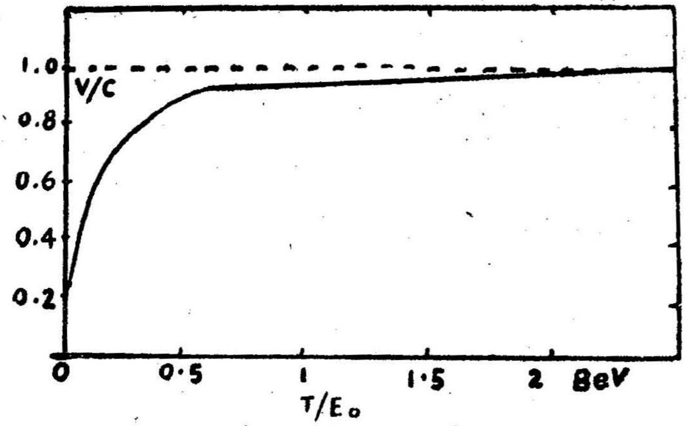
$$= c\sqrt{\left(1 - \frac{E_0^2}{E^2}\right)} \qquad (2.9)$$

அல்லது $$v = c\sqrt{\left\{1 - \frac{E_0^2}{(E_0 + T)^2}\right\}} \qquad (2.10)$$

காட்டாக எலெக்ட்ரானின் $\frac{v}{c}$ க்கும், $\frac{T}{E_0}$ க்கும் இடையே உள்ள தொடர்பைக் காணப் பின்வரும் வரைகோட்டை நோக்கலாம். ஒரு சில *MeV* ஆற்றலிலேயே எலெக்ட்ரானின் வேகம் $v \approx c$ என்றமைவது வரைபடத்தில் இருந்து தெளிவாகும். ஆனுல், புரோட்டான் போன்ற நிறைமிகு துகள்கள் ஒரு சில *BeV* ஆற்றல் அடைந்தால்



எலக்ட்ரான்கள்



புரோட்டான்கள்

படம் 2.1 இயக்க ஆற்றலும் துகளின் வேகமும்

தான், ஒளி வேகத்தை அணுக முடியும். துகள்களின் இத்தகு பண்புகள், முடுக்கும் பொறிகளின் வரலாற்றில் பெருந்திருப்பங்களை உருவாக்கின.

இனி, ஓய்வு நிலை ஆற்றலுக்கும், இயங்கும் பொருளுக்குரிய மொத்த ஆற்றலுக்கும் உரிய தொடர்பு ஒன்றைப் பெறுவோம்.

சமன் 2.9 – லிருந்து $$\frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{E_0{}^2}{E^2}$$

ஆகும். $\frac{v}{c} = \beta$ எனக் குறிப்போமெனில்

$$\frac{E_0^2}{E^2} = 1 - \beta^2 \tag{2.11}$$

என்று பெறலாம்.

$$\therefore \quad E^2 = \frac{E_0^2}{1 - \beta^2} \tag{2.12}$$

ஆகவே

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \tag{2.13}$$

2.3. செயற்படும் புலங்களும் துகளின் இயக்கமும்

பெரும்பான்மையான முடுக்கும் பொறிகளில் இரண்டு விதமான புலங்கள் செயற்படுகின்றன. ஒன்று மின்புலம், மற்றொன்று காந்தப் புலம். மின்புலம் துகளை முடுக்குகின்றது, காந்தப் புலம் துகளை வழிப் படுத்துகின்றது.

மின்புலத்சில் இயங்கும், துகளின் இயக்க ஆற்றல், மின்புலம் அதன்மீது செலுத்தும் விசையைச் சார்ந்ததாகும். துகளின் மின்னூட்டம் q எனவும், மின்புல வலிமை χ எனவும் கொள்வோம். மின்புலம் துகளின் மேற் செலுத்தும் விசை

$$F = q\,\chi \tag{2.14}$$

ஆகும். மின்புலத்தில் துகள் ஒரு புள்ளியிலிருந்து மற்றொரு புள்ளிக்கு dx தூரம் இடம் பெயருவதாகக் கொள்வோம். இதனால் பெறப்பட்ட இயக்க ஆற்றல்,

தொகுநியாக்கம் மூலம் $T = \int F\,dx$

ஆகும். அதாவது $T = \int q\,\chi\,dx$

எனவே, $T = qV$ (2.15)

என்றாகும். இச் சமனிலுள்ள V என்பது மின்னழுத்த வேறுபாட்டைக் குறிக்கின்றது.

இவ்விதம் மின்புலத்தில் இயங்கி எலெக்ட்ரான் பெறும் ஆற்றலை அளக்கப் பயன்படுகிற அலகுகளைக் காண்போம். தன்னிச்சையாக ஓர் எலெக்ட்ரான், 1 வோல்ட் மின்னழுத்த வேறுபாட்டைக் கடக்கும் போது பெறுகின்ற ஆற்றல், ஓர் எலெக்ட்ரான் வோல்ட் (*Electron Volt*) ஆகும். இத்துறையில் இது ஒரு திட்ட அலகாகும். இதைத் தவிர, பின்வரும் வழியலகுகளும் ஆற்றலை அளக்கப் பயன்படுகின்றன.

$$1\ keV = 10^3\ eV$$
$$1\ MeV = 10^6\ eV$$
$$\left.\begin{array}{c}1\ BeV\\ \text{அல்லது}\\ 1\ GeV\end{array}\right\} = 10^9\ eV$$

மின்புலம் காரணமாகவும் காந்தப்புலம் காரணமாகவும், மின்னூட்டம் கொண்ட துகள் பெறும் விசையினை லொரெண்ட்ஸ் (*Lorentz*) என்ற விஞ்ஞானி தெளிவுபடக் கூறினர். இதனை லொரெண்ட்ஸ் விசை (*Lorentz Force*) என்றே கூறுகிறோம். துகளின் மின்புலம் $\mathcal{E}$ எனவும் காந்தப் புலம் B எனவும், துகளின் திசைவேகம் v எனவும் கொள்வோமானல், லொரெண்ட்ஸ் விசை $\vec{F} = q\left(\vec{\mathcal{E}} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$ ஆகும். இங்குக் காந்தப் புலத்தின் விளைவை மட்டும் கருதுவோம். துகளின் வேகம் $\vec{v}$-ம், காந்தப் புலம் $\vec{B}$-ம் ஒன்றுக்கொன்று நேர்குத்தாக அமைந்துள்ளதாகக் கருதுவோம். துகள்மீது செயற்படும் விசை F ஆனது, $\vec{v}$-ம், $\vec{B}$-ம் அமைந்த தளத்திற்கு நேர்குத்தாக இருக்குமாதலால்,

$$F = Bqv \tag{2.16}$$

எனலாம். தன்னுடைய இயக்கத்திற்கு நேர்குத்தாகச் செயற்படும் இந்த விசையால் துகள் ஆற்றலை ஈட்டாது. ஆனல் வட்டப் பாதையில் விலக்கப்படும். துகள் இயங்குகின்ற வட்டப் பாதையின் ஆரம் r எனில்,

$$Bqv = \frac{Mv^2}{r} \tag{2.17}$$

ஆகும்.

$$\therefore\ Br = \frac{Mv}{q}$$

அல்லது

$$Br = \frac{p}{q}$$

$$\therefore\ Br = \frac{1}{q}\left(\frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c}\right) \tag{2.18}$$

சமன் 2.17-லிருந்து r-ஆரமுள்ள வட்டத் தடத்தில் துகளியங்கும் போது அமையவேண்டிய காந்தப் புல மதிப்பைக் கணிக்கலாம். காந்தப்புலம் செயற்படும் முடுக்கும் பொறிகள் யாவற்றிலும் சமன் 2.18 நிறைவு பெற்ருக வேண்டும்.

இனி, சீரான காந்தப்புலத்தில் அமைந்த வட்டப்பாதையில் துகள் இயங்கும்போது, அதன் அதிர்வெண் என்னவென்று கணக்கிடலாம். வட்டத் தடத்தின் ஆரம் r எனில், துகளின் அதிர்வெண்,

$$f = \frac{v}{2\pi r}$$

ஆகும்.

அல்லது,

$$f = \frac{Bq}{2\pi M}$$

$$\therefore f = \frac{Bqc^2}{2\pi Mc^2}$$

எனவே, $$f = \frac{Bqc^2}{2\pi E}$$

அல்லது, $$f = \frac{Bqc^2}{2\pi(E_0+T)} \qquad (2.19)$$

ஆகும். இச் சமன்பாட்டிலிருந்து, துகளின் இயக்க ஆற்றலில் ஏற்படும் உயர்விற்கேற்ப, அதிர்வெண் f குறையும் என்பது புலப்படும்.

ஆனல், சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகள்களின் வேகம் ஒளியின் வேகத்தை நெருங்காத காரணத்தால், இப்பொறியில் துகள் இயக்கத்திற்குச் சார்பியல் கொள்கைகளைப் பயன்படுத்த வேண்டிய தேவையில்லை. எனவே, சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகளின் சுற்று அதிர்வெண் (*Revolution Frequency*)

$$f_0 = \frac{Bq}{2\pi M_0}$$

என்று கொள்ளலாம். அல்லது, $$f_0 = \frac{Bqc^2}{2\pi M_0c^2}$$

$$\therefore f_0 = \frac{Bqc^2}{2\pi E_0} \qquad (2.20)$$

துகளின் இந்த அதிர்வெண் 'f_0' ஆனது 'சார்பியல் சாராத சைக்ளோட்ரான் அதிர்வெண்' (*Non - Relativistic Cyclotron Frequency*) எனப்படும்.

இனி, சார்பியல் சார்ந்த அதிர்வெண்

$$f = \frac{v}{2\pi r}$$

என்றறிவோம். அல்லது $$f = \frac{\beta c}{2\pi r}$$

சமன் 2.11-லிருந்து $$f = \frac{c}{2\pi r}\left\{1-\left(\frac{E_0}{E_0+T}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}$$

ஆகும். (2.21)

சமன் 2.21-ல் r-ஐ மீட்டரில் குறிப்போமெனில்,

$$f = \frac{47 \cdot 8}{r}\left\{1-\left(\frac{E_0}{E_0+T}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \text{ மெகாஹெர்ட்ஸ்} \qquad (2.22)$$

என்று பெறலாம்.

இத் தொடர்பைப் பயன்படுத்தி சில துகள்களுக்குரிய இயக்க ஆற்றலைக் கணக்கிடலாம். அட்டவணை 2.2-ல் இயக்க ஆற்றலுக்கும், தடத்தின் ஆரத்திற்கும் இடையேயுள்ள தொடர்பைக் காணலாம்.

அட்டவணை 2.2.

இயக்க ஆற்றல் *T* (*MeV*)	தட ஆரம் *r* (மீட்டர்)			
	எலெக்ட்ரான்	புரோட்டான்	டாய்ட்ரான் (*Deutron*)	H_e+ அயனி
1	0·00473	0·144	0·204	0·144
10	0·0349	0·457	0·646	0·454
100	0·334	1·480	2·060	1·450
1000	3·33	5·640	7·250	4·850
10000	33·30	36·300	39·000	22·000

இனி, தட அதிர்வெண்ணுக்கும் (*Orbital Frequency*) சில துகள் களின் ஆற்றலுக்கும் உள்ள தொடர்பை அட்டவணை 2.3-ல் காணலாம்.

அட்டவணை 2.3.

இயக்க ஆற்றல் *T* (*MeV*)	துகளின் அதிர்வெண் (ஹெர்ட்ஸ்)			
	எலெக்ட்ரான்	புரோட்டான்	டாய்ட்ரான்	H_e+ அயனி
1	9,500	15·2	7·60	7·61
10	1,635	15·2	7·60	7·60
100	143	13·8	7·34	7·40
1000	14·3	7·46	5·00	6·05
10000	1·43	7·32	1·22	2·11

முடுக்கும் பொறிகளில் முடுக்கப்படுகின்ற துகள்கள் சிலவற்றின் ஓய்வுநிலை ஆற்றல் E_0-ஐ அட்டவணை 2.4-ல் காண்க.

அட்டவணை 2.4

துகள்	ஓய்வு நிலை ஆற்றல் E_0 (MeV)
எலெக்ட்ரான் (e^-)	0·5110
புரோட்டான் (H^+)	938·2
டாய்ட்ரான் (D^+)	1875
ஆல்ஃபாத்துகள் (H_e^{++})	3727

அட்டவணை 2.4-லிருந்து எலெக்ட்ரானின் ஓய்வுநிலை ஆற்றல் மிகக் குறைவாக இருப்பது புலப்படும். இதன் பயனாக எலெக்ட்ரானின் வேகம் ஓரளவே அதிகரித்தாலும் அதன் நிறையில் பெரும் மாற்றம் ஏற்படும். எனவே, அதற்கு முதுபழங்கொள்கை சார்ந்த சமன்பாடுகளைப் பயன்படுத்தல் கூடாது. பிற அயனிகளுக்கோ குறிப்பிட்டதொரு எல்லை வரை முதுபழங்கொள்கைச் சமன்பாடுகளைப் பயன்படுத்தலாம்.

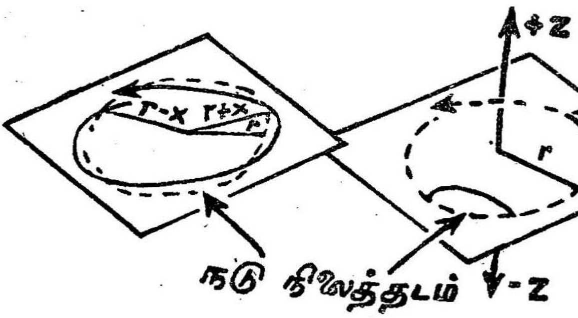
2.4. தட நிலைப்பாடு (Orbit Stability)

துகளை வழிப்படுத்தக் காந்தப் புலம் செயற்படும் முடுக்கிகளில் இறுதி ஆற்றலை அடையும்முன் துகள்கள் மிக நீண்ட பாதையில் பயணம் செய்ய வேண்டியுள்ளது. சிறிய சைக்ளோட்ரான்களில் அரை கிலோமீட்டர் அளவிலும், மிகப்பெரிய சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் பலநூறு ஆயிரம் கிலோமீட்டர்களும் துகள்கள் பயணம் செய்கின்றன. வழிப்படுத்தப்படாமல், எந்தத் துகளும் குறிப்பிட்ட திசையில் துல்லியமாகப் பயணம் செய்யாது. மேலும், துகளின் தடத்தை யொட்டிய ஆயத்திசைகளிலும் (மேலும் கீழும்), ஆரத்திசைகளிலும் (இடமும் வலமும்) ஏற்படும் விலகுதல்களுக்குத் திருத்தம் தரவேண்டும். இல்லையெனில், அயனிகள் *D*-ன் (*Dee's*) சுவர்களிலோ, வெற்றிட அறையின் (*Vacuum Chamber*) சுவர்களிலோ மோதித் தடத்தை விட்டே நீங்கிவிட நேரிடும்.

முடுக்கியில் செயல்படும் காந்தப்புலம் துகள்களை வழிப்படுத்தி மீண்டும் மீண்டும் முடுக்குகின்ற அமைப்பினுள் அனுப்புகின்றது. மேலும், வழி தவறிய அயனிகளைத் தடம் சார்ந்த மேல்—கீழ்;

இட-வல அலைவுகளுக்கு உட்படுத்துகின்றது. தடமானது ஆயத்திசை (*Axial Direction*), ஆரத்திசை (*Radial Direction*) ஆகிய இருதிசைகளிலும் நிலைப்பாடுகளைப் பெறுகின்றது.

பிறழ்ச்சிகளுக்கு உட்படாத எந்தத் தடத்தை ஒட்டி விலகுதல்கள் ஏற்படுகின்றனவோ அந்தத் தடம் நடுநிலைத் தடம் (*Equilibrium Orbit*) எனப்படும்.



படம் 2.2. வட்ட நடுநிலைத் தடம் சார்ந்த பீட்டாட்ரான் அலைவுகள்

2.5. நடுநிலைத் தடத்தை ஒட்டிய பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் (Betatron Oscillations about the Equilibrium Orbit)

இனி, தடநிலைப்பாட்டை உருவாக்கக்கூடிய பீட்டாட்ரான் அலைவுகளைப் (*Betatron Oscillations*) பற்றி விரிவாகக் காண்போம். படம் 2. 2-ல் ஆயத்திசையில் ஏற்படும் திரிபியக்கம் ஓர் உருளைப் பரப்பிலும், ஆரத்திசைத் திரிபியக்கம் காந்தப் புலத்தின் மத்தியத் தளத்திலும் அமைகின்றன. உண்மையில் இரண்டு திரிபியக்கங்களும் ஒருங்கே நிகழ்கின்றன என்றே கூறவேண்டும். காந்தப் புலத்தின் அச்சிற்கு இணையான (*Parallel to z - Axis*) இயக்கம், ஆயத்திசை இயக்கம் (*Axial Motion*) அல்லது செங்குத்து இயக்கம் (*Vertical-Motion*) எனப்படும். துருவங்களுக்கு நடுவில் உள்ள மத்திய தளத்தில் அமையும் நடுநிலைத் தடத்திற்கு நேர்குத்தாகக் காந்தப் புலத்தின் சமச்சீர் அச்சு (*Axis of Symmetry*) உள்ளது. தளத்திலிருந்து மேலும் கீழுமாக ஆயத்திசையில் ஏற்படும் பெயர்ச்சிகளை $+z$, $-z$ என்ற குறியீடுகளால் குறிக்கலாம்.

மத்திய தளத்திலேயே நடைபெறும் இயக்கம் ஆரத்திசை இயக்கம் (*Radial Motion*) எனப்படும். இதைக் கிடைமட்ட இயக்கம்

(*Horizontal Motion*) என்றும் கூறுவர். நடுநிலைத்தடத்தை யொட்டிய இத் திரிபியக்கங்கள் முதன் முதலில் பீட்டாட்ரான் பொறிகளில் அறியப்பட்டன. எனவே, இத் திரிபு இயக்கங்கள் பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் எனப்பட்டன. இந்தப் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் வீச்சையும் அதிர்வெண் களையும் கட்டுப்படுத்துதல் முடுக்கும் பொறிகளின் அமைப்பில் பெரும்பங்கு வகிக்கின்றது.

இரு திரிபியக்கங்களின் இயல்பையும் ஆராய, முதற்கண் இரண்டும் தனித்தனியே நிகழ்வதாகக் கொள்வோம். ஆயத்திசை இயக்கம் நிகழும் தருணத்தில், ஆரமானது மாறிலி என்றும், ஆரத்திசை இயக்கம் முழுமையும் மத்திய தளத்தில்தான் நிகழுமென்றும் கொள்வோம்.

நிலையான தடத்தில் (*Stable Orbit*) இயங்கும் துகள், மத்திய தளத்தை விட்டு விலகும்போது, தளத்தை நோக்கிய மீட்பு விசை (*Restoring Force*)ஒன்றிற்கு உட்படும்.இந்தத் துகளின் இயக்கத்தைத் தனி ஊசல் ஒன்றின் அலைவிற்கு ஒப்பிடலாம். உராய்வு விசைகள் (*Forces of Friction*) எதுவும் இல்லாவிடில், தனி ஊசலை உறுதி நிலையி லிருந்து சிறிதே விலக்கினுல் ஊசல் சமநிலையை ஒட்டி முன்னும் பின்னும் அலையும் என்று அறிவோம். இதைப் போலவே காந்தப் புலத்தில் மத்திய தளத்திலும், அந்தத் தளத்திற்கு அருகிலும் துகள் நடுநிலைத் தடத்தை யொட்டி அலைவு ஒன்றிற்கு உட்படும்.

2.6. புல எண் (Field Index)

சைக்ளோட்ரான் போன்ற காந்தப்புலம் தொழிற்படும் பொறிகளில், காந்தப் புலத்தின் தன்மையினை ஆராய்வது அவசிய மாகின்றது. நடுநிலைத் தடத்தின் ஆரத்தைச் சார்ந்து புலம் வேறுபடும் தன்மையை ஆராயலாம். பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும் நிகழலாம் என்று கண்டோம். ஆரத்திசைப் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் வீச்சு (*Amplitude*) மிகச் சிறியதாகவே அமையும். காந்தப்புல மதிப்பு இடத்திற்கு இடம் ஆரத்திசையில் துல்லியமாக மாறுபடும். இந்தப் பண்பினை ஆராயப் புலஎண் என்றவொரு கருத்துப் பயன்படுகிறது.

மென்குவிப்புப் பொறிகளில் (*Weak Focussing Machines*) உள்ள குவிக்கும் விசைகள் (*Focussing Forces*) காந்தப் புலத்தால்

பெறப்படுகின்றன. இந்தக் காந்தப் புலம் ஆரம் அதிகரிக்க அதிகரிக்க தன்மதிப்பில் குறையும் என்பதைப் பின்னர் காண்போம். எனவே, r ஆரமுள்ள ஒரு வட்டத்தடத்தில் காந்தப்புலம் B எனில், அதன் புறத்தே அமையும் சற்று அதிகமான $r+dr$ ஆரம் கொண்ட தடத்தில், காந்தப் புலத்தின் மதிப்பு $B-dB$ என்று ஆகும்.

அஃதாவது, முன் கூறப்பட்டபடி ஆரத்திசை பற்றிய முதல் தடத்திற்கும் இரண்டாம் தடத்திற்கும் இடையே உள்ள தூரம் dr எனவும், ஆங்கமைந்த காந்தப் புலங்களின் மாறுபாடு dB எனவும் ஆகும்.

$\frac{-dB}{B}$ என்பது புலத்தின் கூற்றுத்தகவு (*Ratio of the Fractional change*) ஆகும். மேலும் $\frac{dr}{r}$ என்பது ஆரத்தின் கூற்றுத்தகவு ஆகும். இவற்றைப் பயன்படுத்திப் புலஎண் என்னும் பயனுள்ள கருத்தைக் குறிக்கலாம்.

புல எண் $$n = \frac{\text{புலத்தின் பின்னத் தகவு}}{\text{ஆரத்தின் பின்னத் தகவு}}$$

அஃதாவது $$n = \frac{\frac{-dB}{B}}{\frac{dr}{r}}$$

$$\therefore \; n = -\frac{d(\ln B)}{d(\ln r)} \qquad (2.23)$$

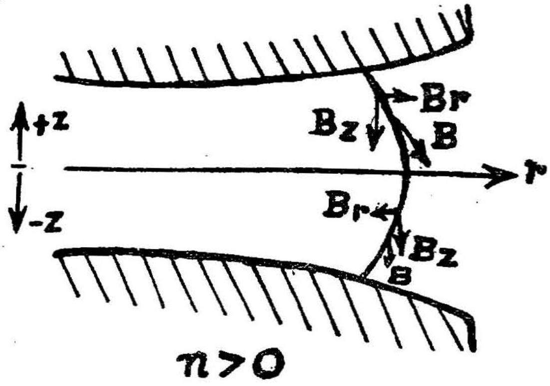
ஆகும்.

ஆரத்திசை பீட்டாட்ரான் திரிபு இயக்கங்கள் r ஆரமுள்ள தடத்தை ஒட்டி நிகழுமெனில், இந்த ஆரத்திற்குள் அடங்கும் எல்லையில் புலஎண் 'n' என்பது ஒரு மாறிலியாகும். பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் தன்மையை ஆராய இந்தப் புலஎண் பெரிதும் துணை செய்யும்.

2.7. ஆயத்திசை நிலைப்பாடு (Axial Stability)

செயற்படும் காந்தப் புலம் B-ன் ஆயத்திசைக் கூறு B_z எனவும், ஆரத்திசைக் கூறு B_r எனவும் கொள்வோம். முடுக்கும் பொறி ஒன்றில் ஒன்றுக்கொன்று இணையாக அமையாமல், அகன்று சென்ற

வாறு இருக்கின்ற காந்தத் துருவங்களின் முகப்புகளைப் படம் 2.3-ல் காணலாம்.



படம் 2.3 புலக் கூறுகள்

இம் முகப்புகளுக்கிடையே r ஆரம் கொண்ட வட்டப் பாதையில் துகள் இயங்குகின்றது. இதனைத் துகளின் நடுநிலைத் தடமாகக் கொள்ளலாம். துருவங்களுக்கு இடையே அமையும் காந்த விசைக் கோடு எவ்வாறு அமையும் என்பதையும் படம் 2.3-ல் காணலாம்.

காந்தப் புலத்தின் கிடைக்கூறுன B_r, z ஐப் பொறுத்து மாறும். B_r க்கும் z க்கும் இடையே உள்ள தொடர்பை டெய்லர் (Taylor) தொடர்பால் பின்வருமாறு குறிக்கலாம். எனவே,

$$B_r = z\left(\frac{\partial B_r}{\partial z}\right)_{z=0} + \frac{z^2}{2}\left(\frac{\partial^2 B_r}{\partial z^2}\right)_{z=0} + \ldots\ldots\ldots \qquad (2.24)$$

ஆகும். z-ன் குறைந்த மதிப்புகளுக்கு இத் தொடர்பின் வலப்புறத்தில் அமைந்த முதல் உறுப்பே போதுமானது. ஆகவே,

$$B_r = z\left(\frac{\partial B_r}{\partial z}\right) \qquad (2.25)$$

என்று கூறலாம். காந்தவியல் ஆய்வுகளின்படி நிலையான காந்தப் புலத்திற்கு

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \qquad (2.26)$$

ஆகும்.

அஃதாவது,

$$\frac{1}{r}\begin{vmatrix} \vec{a}_r & r\vec{a}_\phi & \vec{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \phi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_r & rB_\phi & B_z \end{vmatrix} = 0 \tag{2.27}$$

எனவே, $$\left(\frac{\partial B_r}{\partial z}\right)_{z=0} = \left(\frac{\partial B_z}{\partial r}\right)_{z=0} \tag{2.28}$$

என்று பெறலாம். ஆகவே, சமன் 2.25-லிருந்தும் 2.28-லிருந்தும்

$$B_r = z\left(\frac{\partial B_z}{\partial r}\right)_{z=0} \tag{2.29}$$

ஆகும்.

மத்தியதளத்தில் $z=0$ ஆதலால் $B_r=0$ எனவும் $B_z=B$ எனவும் மதிப்புகளைப் பெறும். எனவே சமன் 2.29-லிருந்து,

$$B_r = z\frac{\partial B}{\partial r} \tag{2.30}$$

என்றாகும். மேலும் புல எண் $n = -\frac{\partial B/B}{\partial r/r}$

ஆதலால், $$\frac{\partial B}{\partial r} = -\frac{nB}{r}$$

ஆகும். இதனால் சமன் 2-30-ஐ

$$B_r = -\frac{znB}{r} \tag{2.31}$$

என்று எழுதலாம். காந்தப் புலத்தின் ஆரத்திசைக்கூறின் மாறு பாட்டைத் தெளிவாக அறிய சமன் 2.31 துணை நிற்கும்.

இனி, ஆயத்திசை பீட்டாட்ரான் இயக்கத்தை ஆராய்வோம். மத்திய தளத்திலிருந்து, z உயரத்தில் மாறுத வேகம் v-உடன் இயங்கும் துகளானது ஆயத்திசையில் qvB_r என்னும் லொரெண்ட்ஸ்

விசைக்கு உட்படும் என்று அறிவோம். ஆகவே, ஆயத்திசையில் செயல்படும் விசையை சமன் 2.31-லிருந்து $qv\left(\frac{-znB}{r}\right)$ எனப் பெறலாம். எனவே ஆயத்திசை பீட்டாட்ரான் இயக்கத்திற்குரிய சமன்பாடு

$$M\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{qvnB}{r}z \qquad (2.32)$$

ஆகும்.

சைக்ளோட்ரானுக்குரிய ஒத்திசைவுத் தொடர்பு

$$M\omega = qB \qquad (2.33)$$

$$\therefore \quad M\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{vnM\omega z}{r}$$

அல்லது,

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\omega^2 nz$$

எனவே,

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \omega^2 nz = 0 \qquad (2.34)$$

ஆயத்திசை பீட்டாட்ரான் இயக்கத்திற்குரிய தொடர்பு 2.34-ஐக் கெர்ஸ்ட் (*Kerst*), செர்பர் (*Serber*) என்ற இரு அறிவியலாளர்கள் முதலில் கண்டனர். ஆகவே இச் சமன்பாட்டைக் கெர்ஸ்ட்-செர்பர் சமன்பாடு (*Kerst Serber Equation*) எனக் குறிப்பர்.

இச் சமன்பாட்டிற்குரிய எளிய தீர்வு $z=0$ என்பதாகும். அதாவது, இத் தீர்வு ஆயத்திசையில் பிறழ்ச்சியற்ற தடத்தைக் குறிக்கும். இதே சமன்பாட்டிற்குரிய பொதுத் தீர்வு,

$$z = z_m \, Sin\,(n^{\frac{1}{2}}\,\omega t) \qquad (2.35)$$

என்பதாகும். சமன் 2.35-லிருந்து துகளானது z_m வீச்சுடன் மத்திய தளம் சார்ந்த சீரிசை இயக்கத்திற்கு (*Simple Harmonic Motion*) உட்படுகின்றது எனலாம். இந்த இயக்கத்தின் ரேடியன் அதிர்வெண் (*Radian Frequency*),

$$\omega_z = n^{\frac{1}{2}}\,\omega$$

என்பதாகும். ஆகவே, துகளின் ஒரு முழுச் சுற்றில் நிகழும் ஆயத் திசை பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் எண்ணிக்கை,

$$\nu_z = \frac{\omega_z}{\omega}$$

ஆகும். அதாவது

$$\nu_z = n^{\frac{1}{2}} \qquad (2.36)$$

என்றாகும். மென்குவிப்பு வட்டப் பொறிகளில் மிக முக்கியமான இடத்தை சமன் 2.36 வகிக்கின்றது.

மென் குவிப்புப் பொறிகளில் புல எண் n-னின் மதிப்பு ஒன்றை விடக் குறைவாக இருக்கவேண்டும். ஆகவே $n^{\frac{1}{2}}$ என்பதும் ஒன்றை விடக் குறைவானது. எனவே ν_z -ம் ஒன்றைவிடக் குறைவானதாகும். அதாவது மென்குவிப்புப் பொறிகளில் துகளின் ஒரு முழுச் சுற்றிற்குள் முழுமையான பீட்டாட்ரான் திரிபு இயக்கம் ஒன்றுகூட நிகழாது.

மேலும் புல எண் ஆனது n இங்கு நேர்க்குறி உடையதாகும். ஆகவே ஆயத்திசையில் நிலைப்பாடு அமைய வேண்டுமானால், புல எண்ணின் மதிப்பை அதிகரித்துக் கொண்டே போகலாம். தெளிவாகச் சொன்னால் ஆயத்திசை பீட்டாட்ரான் திரிபு இயக்க நிலைப்பாடு காரணமாகப் புலஎண்ணின் மதிப்பு சுழியம் முதற்கொண்டு ஈறிலி வரையிலும் (0 *to* ∞) இருக்கலாம்.

2.8. ஆரத்திசை நிலைப்பாடு (Radial Stability)

இனி, பீட்டாட்ரான் அலைவுகளில் ஆரத்திசை நிலைப்பாட்டிற்கு உரிய விதியைப் பெறுவோம். ஆரத்திசையில் துகள் ஒன்றின் முடுக்கம் $\frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2$ என்று அறிவோம். அதாவது ஆரத்திசை

முடுக்கத்தை
$$\frac{d^2r}{dt^2} - \frac{v^2}{r} \tag{2.37}$$

என்ற தொடர் குறிக்கும். எனவே விசையானது,

$$M\frac{d^2r}{dt^2} - \frac{Mv^2}{r} \tag{2.38}$$

என்றாகும்.

ஆரத்திசையில் இவ் விசையை அளிப்பது காந்தப் புலத்தின் நேர்க் குத்துக் கூறு B_z ஆகும். இவ்விசை காரணமாக ஆரம் r ஆனது குறைவுறும். இதனைக் குறிக்க இவ் விசைக்கு எதிர்க்குறி இணைக்கப்பட வேண்டும். ஆகவே இவ் விசையானது '$-qvB_z$' என்றாகும். மத்தியதளத்தில் இயக்கம் நடைபெறுவதாகக் கொண்டால் $B_z = B$ என்றாகும். எனவே, ஆரத்திசைப் பீட்டாட்ரான் இயக்கத்திற்குரிய சமன்பாடு

$$M\frac{d^2r}{dt^2} - \frac{Mv^2}{r} = -\ qvB \tag{2.39}$$

எனலாம்,

இந்தச் சமனுக்குரிய எளிய தீர்வு

$$r = \text{மாறிலி}$$

என்பதாகும். எனவே சமன் 2.39 – லிருந்து

$$\frac{Mv^2}{r} = qvB$$

என்று கூறலாம்.

$$\therefore p = Mv = qBr \qquad (2.40)$$

r - ஆரமுடைய இந்தத் தடத்தில் p உந்தத்துடன் அயனி இயங்க வேண்டுமெனில், அந்த அயனி உரிய திசை வேகத்துடன் தடத்தை நோக்கித் தொடுவியலாகச் செலுத்தப்பட வேண்டும் என்பதை சமன் 2.40-லிருந்து அறியலாம்.

இனி, இவ்வாறு உரிய தடத்தில் இயங்கும் துகள் சில சூழ்நிலை களால் இந்தத் தடத்தை விட்டு வேறுதடத்தில் சென்றால், மீண்டும் பழைய தடத்தை நோக்கித் திரும்புமா, அல்லது விலகிச் சென்று விடுமா என்பதை நிலைப்பாடு நிறுவும்.

துகள் இயங்கும் நடுநிலைத்தடத்தின் ஆரத்தை r_e என்று குறிப்போம். இதிலிருந்து x தூரத்திலுள்ள மற்றொரு தடத்தைக் கருதலாம். இந்தத் தடத்தின் ஆரம் r_e+x ஆகும். இங்கு $x<<r_e$. எனவே r_e+x ஆரமுள்ள தடத்தில் இயக்கத்தைக் குறிக்க,

$$M\frac{d^2}{dt^2}(r_e+x) - \frac{Mv^2}{(r_e+x)}+qvB_x=0 \qquad (2.41)$$

என்ற தொடர்பைப் பயன்படுத்தலாம். இதில் r_e+x ஆரமுள்ள தடத்தில் அமைந்த காந்தப்புல மதிப்பை B_x குறிக்கின்றது.

மேலும் $x << r_e$, ஆதலால்,

$$\frac{1}{(r_e+x)} = \frac{1}{r_e\left(1+\frac{x}{r_e}\right)}$$

$$\approx \frac{1}{r_e}\left(1-\frac{x}{r_e}\right) \qquad (2.42)$$

ஆகும். r_e ஒரு மாறிலியாக இருப்பதாலும், சமன் 2.42-லிருந்தும் சமன் 2.41-ஐப் பின் வருமாறு எழுதலாம்,

$$M\frac{d^2x}{dt^2}-\frac{Mv^2}{r_e}\left(1-\frac{x}{r_e}\right) + qvB_x = 0 \qquad (2.43)$$

r_e ஆரத்தில் புலமதிப்பு B_e எனில்

$$\frac{Mv^2}{r_e} = qvB_e \qquad (2.44)$$

ஆதலால்,

$$M\frac{d^2x}{dt^2} - qvB_e\left(1 - \frac{x}{r_e}\right) + qvB_x = 0$$

என்று எழுதலாம்.

$$\therefore \quad M\frac{d^2x}{dt^2} + q\,v\,(B_x - B_e) + \frac{qvB_ex}{r_e} = 0.$$

ஆகும். B_x-ஐ டெய்லரின் தொடரால் குறிப்போமானால்,

$$B_x = B_e + x\frac{\partial B}{\partial r} + \ldots\ldots\ldots$$

ஆகும்.

$$\therefore B_x - B_e \approx x\frac{\partial B}{\partial r} \qquad (2.45)$$

மேலும், $$v \approx \omega r_e \qquad (2.46)$$

எனில், சமன் 2.44-லிருந்து

$$\frac{q}{M} = \frac{\omega}{B_e}$$

ஆதலால்,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{q}{M}v\,(B_x - B_e) + \left(\frac{qvBe}{M}\right)\frac{x}{r_e} = 0 \qquad (2.47)$$

அல்லது,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega^2 r_e}{B_e}\ \frac{dB}{dr}\cdot x + \omega^2 x \quad = 0 \qquad (2.48)$$

புல எண். $n = -\dfrac{r_e}{B_e}\ \dfrac{dB}{dr}$ ஆதலால், சமன் 2.48-ஐ

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2\,(1-n)\,x \quad = 0 \qquad (2.49)$$

என்று எழுதலாம். இச் சமன்பாடு ஆரத்திசைப் பீட்டாட்ரான் இயக்கத்திற்கு உரிய கெர்ஸ்ட் - செர்பர் சமன்பாடு ஆகும். இதன் எளிய தீர்வு

$$x = 0 \qquad (2.50)$$

ஆகும்.

இது நடுநிலைத் தடத்தைக் குறிக்கின்றது. ஆனால் 2.49-ன் அரிய தீர்வு

$$x = x_m \, Sin\,(1-n)^{\frac{1}{2}} \omega t \qquad (2.51)$$

ஆகும். மேலும், இந்த இயக்கத்தின் ரேடியன் அதிர்வெண்

$$\omega_x = \omega \,(1-n)^{\frac{1}{2}} \qquad (2.52)$$

ஆகும். எனவே ஒரு முழுச்சுற்றில் ஏற்படும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் எண்ணிக்கை

$$\nu_x = \frac{\omega_x}{\omega} \qquad (2.53)$$

அல்லது,

$$\nu_x = (1-n)^{\frac{1}{2}} \qquad (2.54)$$

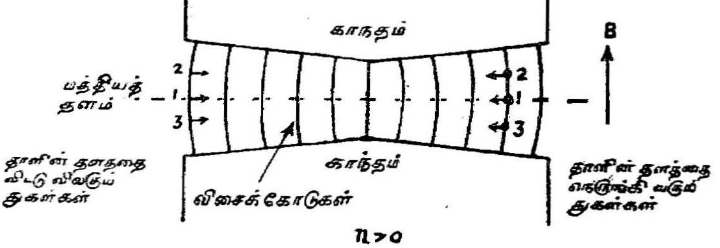
என்றாகும்.

சமன் 2.53-லிருந்து எதிர்க்குறி கொண்ட எந்த மதிப்புடைய எண்ணாகவும் புல எண் இருக்கலாம் என அறிகிறோம். அதாவது ஆரத்திசை நிலைப்பாட்டிற்குரிய புலஎண் ஆனது எதிர்க்குறி ஈறிலி முதற்கொண்டு ஒன்றுவரை ($-\infty$ *to* $+1$) எந்த எண்ணாகவும் இருக்கலாம் என்றாகிறது.

மேற்கூறியவாறு, ஆயத்திசை நிலைப்பாட்டிற்குரிய இலக்கணத்தையும் ஆரத்திசை நிலைப்பாட்டிற்குரிய இலக்கணத்தையும், ஒன்றுக்கொன்று தொடர்பில்லாத வகையில் தனித்தனியே கண்டோம். ஆனால், துகள் இயங்கும்போது, இருதிசை பீட்டாட்ரான் திரிபியக்கங்களும் இணைந்தே செயல்படுகின்றன என்பதை முன்னரே குறிப்பிட்டோம். ஆகவே, இரு தனித்தீர்வுகளையும் இணைத்துப் பொதுவான தீர்வு காண்போமெனில், புல எண் ஆனது சுழியத்தில் இருந்து ஒன்றிற்குள் (0 *to* +1) அமையும்போதுதான் ஆரத்திசை மற்றும் ஆயத்திசை ஆகிய இருதிசைகள்பற்றிய நிலைப்பாடுகளும் ஒருங்கே நிலவும் என்பது தெளிவாகும்.

2.9. தடநிலைப்பாடு எல்லைகள்

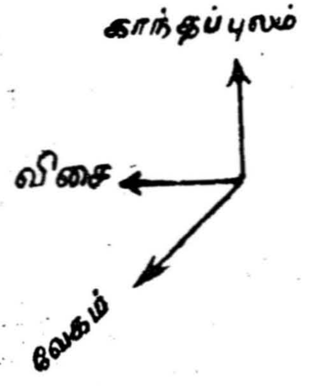
நாம் முன்னரே கண்டவாறு மென்குவிப்புப் பொறிகளில் துருவ முகப்பின் விளிம்பை நெருங்க நெருங்கக் காந்தப்புலம் குறைய வேண்டும். அப்பொழுதான் துகளியங்கும் தடம் நிலைப்பாடு உடைய



படம் 2.4 புல அமைப்பு

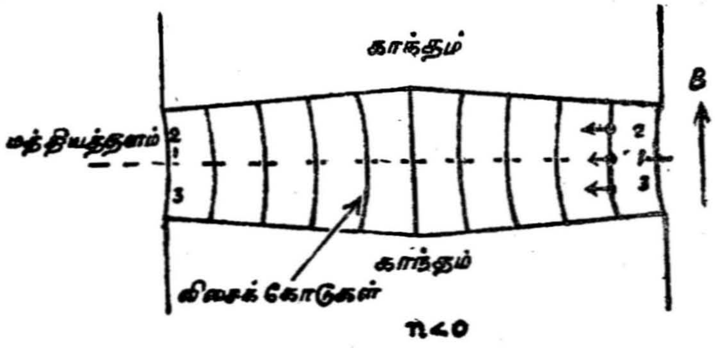
தாகும். இந்த நிலையை அடைய வேண்டுமெனில், புலக் கோடுகளின் அமைப்பு படம் 2·4-ல் உள்ளவாறு வெளியே புடைத்துக் கொண்டு இருக்க வேண்டும்.

மத்திய தளத்தில் காந்தப் புலத்தில் இயங்கும் துகள்மீது செயற்படும் விசை, புலத்திற்கும் துகளின் வேகத்திற்கும் நேர்குத்தாகச் செயற்படும். மத்திய தளத்தின் மீதுள்ள விசை முழுமையும் ஆரத்திசை விசை (*Radial Force*) ஆகும். இந்த விசை மையத்தை நோக்கிச் செயற்படும். B_z–ஆனது ஆயத்திசையில் குவிக்கின்ற விசையை (*Axial Focussing Force*) தோற்றுவிக்கின்றது. எனவே, துகளானது வட்டத்தடத்தை உருவாக்கும்.



படம் 2.5 செயல்படும் காந்த விசையும் துகளின் வேகமும்

படம் 2.4-ல் உள்ள துகள் 1 மட்டுமே மத்திய தளத்தில் உள்ளது. எனவே, அத் துகளானது தாளின் தளத்தை விட்டு வெளியே வரும்போது, மையத்தை நோக்கிய விசையொன்றை அனுபவிக்கும். எனவே, அத் துகள், வட்டத் தடத்தில் சுழலும். துகள்கள் 2-ம் 3-ம் மத்திய தளத்தில் அமையவில்லை. இருப்பினும்



படம் 2.6 புலஅமைப்பு

$n>0$ ஆக அமைவதால் செங்குத்துத் திசையில் நிலைப்பாடு (*Vertical Stability*) தோன்றும். இதனால், துகள்கள் மத்தியதளம் நோக்கிய விசையொன்றை அனுபவித்து, மத்தியதளம் சார்ந்த ஆயத்திசை

அலைவிற்கு உட்படும். இந்த அலைவுகளே பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் (*Betatron Oscillations*) எனப்படும்.

இனி $n<0$ எனில் துகளின் இயக்கம் அமையும் விதத்தை நோக்குவோம். படம் 2.6-ல் புல அமைப்பு உள்நோக்கிக் குழிந்து இருப்பதைக் காணலாம். மத்திய தளத்தில் இயங்கும் துகள் 1 ஆனது தாளின் தளத்தை விட்டு வெளியே வரும்போது, மையத்தை நோக்கிய விசைக்கு உட்பட்டு, வட்டத்தடத்தில் இயங்கும். ஆனால், மத்திய தளத்தில் இருந்து விலகியுள்ள துகள்கள் 2, 3-ன் மீது மத்திய தளத்தை நோக்கிய விசை செயல்படாததால், அவை மத்திய தளத்தை விட்டு விலகிச் செல்லும். ஆகவே, இந்தத் துகள்கள் சுருள்பாதையில் இயங்கி, மேலோ அல்லது கீழோ உள்ள துருவ முகங்களில் மோதி, துகள் கற்றையை விட்டுத் தவறிப் போகலாம். ஆகவே, ஆரம் உயர, தன் மதிப்பில் உயருகின்ற காந்தப்புலம், துகள்களை நிலைப்பாடற்றதாக்கலாம். எனவே, இத்தகு புலஅமைப்பு ($n<0$) மென்குவிப்புப் பொறிகளுக்கு உகந்த தன்று என அறியலாம்.

இனி, சமன்கள் 2.36, 2.54 லிருந்து,

$$\frac{\omega_x}{\omega_z} = \left(\frac{1-n}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.55}$$

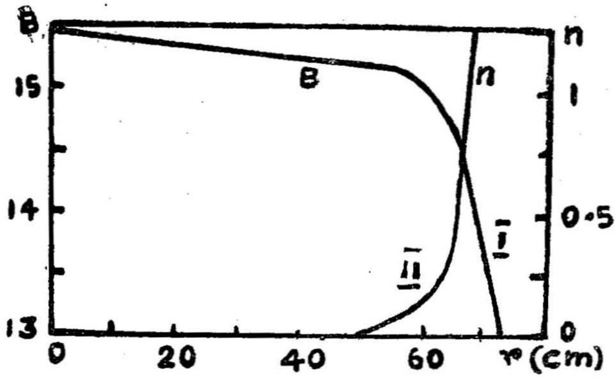
என்று பெறலாம். இதில் புலஎண் மதிப்பு $0<n<1$ ஆகும். சைக்ளோட்ரான் போன்ற மென்குவிப்புப் பொறியில், மையத்தில் புலஎண் n ன் மதிப்பு சுழியமாகவும், ஆரத்திசையில் அதிகரித்துக் கொண்டும் போகும். இவ்வாறு புலஎண் அதிகரித்துக் கொண்டே சென்று $n=0{\cdot}2$ எனில்

$$\frac{\omega_x}{\omega_z} = 2 \tag{2.56}$$

என்றாகும். அதாவது, ஆரத்திசை அலைவுகளின் அதிர்வெண் ஆயத்திசை அலைவுகளின் அதிர்வெண்ணின் முழுஎண் மடங்காக (*Integral Multiple*) அமைகின்றது. இந் நிலையில் இருவகை அலைவு களுக்கும் இடையில் ஆற்றல் பரிமாற்றம் நிகழலாம். இதன் பயனாக ஆரத்திசையிலோ, அல்லது ஆயத்திசையிலோ வீச்சுகள் வரம்பு கடந்து அதிகரிக்கும். இந்த நிலைக்கு ஒத்திசைவு (*Resonance*) எனப் பெயர்.

இந்த ஒத்திசைவு உருவாகுமானால், வீச்சு மிகுந்த அலைவுகளின் காரணமாக அயனிகள் வெற்றிட அறையின் சுவரில் மோதி இழப்புக்கு உள்ளாகலாம். எனவே, மென்குவிப்புப் பொறியில் புலஎண்

மதிப்பு 0·2 வைவிடக் குறைவாக இருக்கவேண்டும். காட்டாக சைக்ளோட்ரானில், துகள் ஒன்றின் தட ஆரத்திற்கும் காந்தப் புலத் திற்கும் உள்ள தொடர்பைப் படம் 2.7-ல் காணலாம் (வரைகோடு *I*). மேலும் ஆரத்திற்கும் புல எண்ணிற்கும் இடையேயுள்ள தொடர்பை வரை கோடு *II* குறிக்கிறது. எனவே, இந்த வரைபடத்திலிருந்து



படம் 2.7 ஆரமும் புலப்பண்புகளும்

சைக்ளோட்ரான் செயல்படுவதற்குரிய ஆரமதிப்பும் புலஎண் மதிப்பும் தெரிய வரும்.

2.10. கலைக்கோண நிலைப்பாடு (Phase Stability)

முடுக்கும் பொறிகளில், துகள்கள் முடுக்கம் அடைந்து ஆற்றல் பெறுகின்றன. அயனி வாயிலிருந்து துகள்கள் கற்றையாக வந்து கொண்டே இருக்கும். துகள்களின் எண்ணிக்கை ஆயிரக்கணக்கில் இருக்கலாம் என்று கூறினாலும் பிழையில்லை. தெளிவான விளக்கம் பெற, எடுத்துக்காட்டாக 'ஆயிரம்' என்று துகள்களின் எண்ணிக்கை யைக் குறிப்பிடலாம். இந்த ஆயிரம் துகள்களும் இறுதியாகச் சீரான ஆற்றல் பெற்று வெளிவரவேண்டும் என்பது நோக்கமாகும்.

தொடக்கத்திலிருந்து இறுதியாக வெளிவருவதற்குள்ளாக, இந்தத் துகள்கள் பலமுறை முடுக்க சாதனத்துள் (*Accelerating-Unit*) இயங்கி முடுக்கம் பெறுகின்றன. ஆயிரம் துகள்களுள் எல்லாமே ஒவ்வொரு முறையும் தவருது முடுக்க சாதனத்தை நெருங்கிப் பயன்பெறும் என்று சொல்வதற்கில்லை. ஏதோ ஒருசில மட்டுமே முடுக்க சாதனத்தை உரிய நேரத்தில் நெருங்கி, உரிய அளவு ஆற்றலைப் பெற முடியும். பெரும்பாலான துகள்கள் இவ் வகையில்

முடுக்க சாதனத்தை நெருங்கிப் பயன்பெற முடிவதில்லை. இந்த இடர்ப்பாட்டை நீக்கி எல்லாத் துகள்களும் இறுதியில் ஒரே அளவு ஆற்றல்பெற்று வெளிவருமாறு வாய்ப்பளிக்க வேண்டும்.

ஒத்திசைவு முடுக்கிகளில் (*Resonant Accelerators*) தமக்குரிய தடத்தில் இயங்கும் துகள்கள் முடுக்க சாதனத்தை அணுகும்போது, துகள்களின் கலைக்கோணம், மின்புலத்தின் கலைக்கோணத்துடன் இசைவு பெறவேண்டும். இந்த இசைவு நிலவினால்தான் துகள்கள் தம் ஆற்றலைப் பெருக்கிக்கொள்ள இயலும். மேலும், இந்த இசைவு நீடித்தால்தான் மீண்டும் மீண்டும் முடுக்க சாதனத்தை அடையும் துகள்களின் ஆற்றல் வளர்ந்துகொண்டே போகும். இவ்விதம் உரிய தருணத்தில் முடுக்க சாதனத்தை நாடி உரிய ஆற்றல் பெறும் துகள்கள் இசைவுறு துகள்கள் (*Synchronous Particles*) என்று கூறப்படும். பிற துகள்கள் இசைவுறுத் துகள்கள் (*Nonsynchronous Particles*) என்று கூறப்படும்.

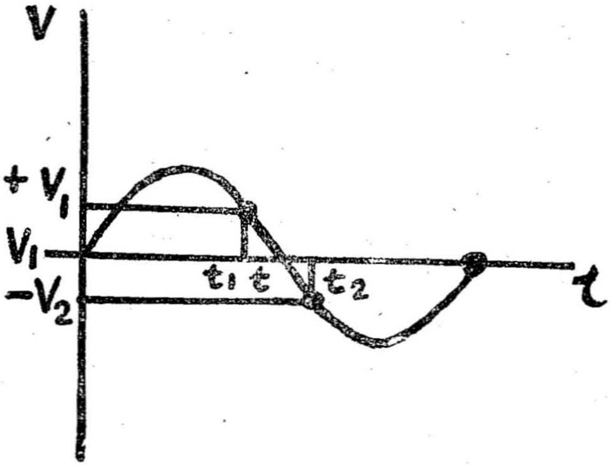
இந்த இசைவுறுத் துகள்களையும், இசைவுறு துகள்களின் இயல்பைப் பெறுமாறு செய்ததே கலைக்கோண நிலைப்பாடு (*Phase Stability*) என்னும் தத்துவமாகும். 1945-ல் மாக்மில்லன் (*Mcmillan*), வெக்ஸ்லர் (*Veksler*) என்ற இருவராலும் முடுக்கும் பொறிகளில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு பயன்படுத்தப்பட்டது. தடநிலைப்பாட்டிற்குரிய பீட்டாட்ரான் அலைவுகளும், கலைக்கோண நிலைப்பாடு தத்துவமும் முடுக்கும் பொறிகளின் வரலாற்றில் முக்கிய திருப்பங்களைத் தோற்றுவித்தன.

புல எண் n-ன் மதிப்பு $0<n<1$ உடைய காந்தப் புலத்தில் தடநிலைப்பாடு பெற்று இயங்கும் துகளொன்றைக் கருதுவோம். இத் துகளின் தடத்தில் அமைந்த இடைவெளி யொன்றில், மின் முனைகளினால் உயர் அதிர்வெண் (*High Frequency*) மின்னழுத்தத்தைத் தோற்றுவிக்கலாம்.

E_0 ஓய்வு நிலை ஆற்றலும், T இயக்க ஆற்றலும் உடைய துகளின் தடச்சுற்று அதிர்வெண் (*Orbital Revolution Frequency*) $f=f_0\left(\frac{1}{1+T/E_0}\right)$ என்றறிவோம். முடுக்கந்தரும் இடைவெளியை நாடும்போது, துகளின் அதிர்வெண் f, மின்னழுத்தத்தின் அதிர்வெண்ணோடு இசைவுறும்படி சீரமைக்கலாம்.

படம் 2.8-ல், இடைவெளியில் தோன்றும் மின்னழுத்தம் Vயின் இயல்பைக் காணலாம். கலைக்கோண நிலைப்பாட்டை ஆராய வசதியாக இருக்க, காந்தப்புலம் B-ம், அலைவானின் அதிர்வெண்ணும்

மாறிலிகள் எனக் கருதுவோம். காலம் t ஆக இருக்கும் தருணத்தில் இடைவெளியைத் துகள் ஒன்று கடப்பதாகக் கொள்வோம். காலம் t ஆக இருக்கும்போது மின்னழுத்தம் V-சுழிய மாகின்றது. எனவே, துகளின் ஆற்றலில் எவ்வித மாற்றமும்



படம் 2.8 மின்னழுத்த வேறுபாடும் துகளின் இயக்கமும்

ஏற்படாது. துகளின் தடச்சுற்று அதிர்வெண்ணும், மின்னழுத்த அதிர்வெண்ணும் இசைவுறுமாறு செய்வோம். இந் நிலையில் துகள் அடுத்த பயணத்தில் இடைவெளியை நாடும்போது மின்னழுத்தம் சுழியமாகவே இருக்கும். எனவே, இம் முறையும் துகள் ஆற்றலைப் பெருக்கிக்கொள்ள முடியாது. ஆகவே, இத்தகு இசைவுறுதுகள்கள் எத்தனை முறை முடுக்கும் சாதனத்தை நாடினாலும், ஆற்றலில் மாற்ற மெதுவும் ஏற்படாது.

இனி, t க்குச் சற்றே முன்னால் t_1 கணத்தில் முடுக்குந்தரு சாதனத்தை நாடும் துகள் பெறும் மாற்றம் என்னவென்று காண்போம். காலம் t_1 ஆக உள்ளபோது மின்னழுத்தம் V_1 மதிப்பு உடையதாகும் (படம் 2.8). ஆகவே, முடுக்கப்படும் துகளின் மின்னூட்டம் q எனில், அந்தத் துகள் முடுக்கம் பெற்று மீண்டும் இயங்கும் போது, அதன் ஆற்றல் qV_1 அளவு அதிகரித்திருக்கும். இயக்க ஆற்றலில் ஏற்படும் இந்தப் பெருக்கத்தால் துகளின் மொத்த ஆற்றலும் அதிகரிக்கும்.

B காந்தப்புலத்தில் இயங்கும் துகளின் கோண அதிர்வெண் ω எனவும், மொத்த ஆற்றல் *E* எனவும் குறிப்போமெனில், துகளின் கோண அதிர்வெண் $\omega = \frac{Bqc^2}{E}$ ஆகும். எனவே, துகளின் ஆற்றல் பெருகப் பெருக ω குறையும் என்பது தெளிவாகும்.

இதனால் முதல் முறை t_1 கணத்தில் சாதனத்தை நாடிய துகள் இரண்டாம் முறை நாடும் போது t_2 காலம் எடுத்துக் கொள்கிறது. t_2 கணத்திற்குரிய மின்னழுத்தம் V_2 ஆனது எதிர்க்குறி உடைய தாகும். ஆகவே துகள் எதிர்முடுக்கம் பெற்று qV_2 அளவு ஆற்றலை இழந்துவிடும். எனவே துகளின் மொத்த ஆற்றல் குறையும். இதனால் அதன் தடச்சுற்று அதிர்வெண் அதிகரிக்கும். எனவே, மூன்றும் முறை முடுக்கும் சாதனத்தைத் துகள் t_2 விற்கு முன்னரே சந்திக்க வாய்ப்புண்டு. அது t_1 ஆக அமையுமானால், துகளானது மீண்டும் முடுக்கம் பெறும்.

எனவே, துகள் சுழிய மின்னழுத்தத்தை (*Zero Potential*) ஒட்டி அலைவிற்கு உட்படுவதாகக் கூறலாம். உண்மையில் துகளின் ஆற்றல் அதன் சமநிலை ஆற்றலை (*Equilibrium Energy*) ஒட்டி அலைகின்றது எனலாம். அதாவது, இந்தச் சமநிலை ஆற்றல் முடுக்கும் மின்னழுத் தத்துடன் ஒத்திசைவு பெற்றுள்ளதெனலாம். இத்தகு அலைவுகள் கலைக்கோண அலைவுகள் (*Phase Oscillations*) எனப்படும். துகள் எப்பொழுதும் சமநிலை கலைக்கோண நிலையையே நாடுவதால், இந்தக் கலைக்கோண அலைவுகள் நிலைப்பாடு உடையனவாகும்.

இத்தகு கலைக்கோண அலைவுகள் சிங்க்ரோட்ரான் (*Synchrotron*) எனப்படும் முடுக்கும் பொறியில்தான் முதன்முதலில் அறியப்பட்டன. எனவே, இவை சிங்க்ரோட்ரான் அலைவுகள் (*Synchrotron Oscillations*) என்று கூறப்படுகின்றன.

2.11. நேரியல் பொறியில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு (Phase Stability in Linear Accelerator)

உரிய கலைக்கோணத்தில் முடுக்கும் சாதனத்தை நாடி உரிய ஆற்றலைப் பெறும் துகளை இசைவுறுதுகள் என்றும், இவ்வாறு நாடாத துகளை இசைவுறுத்துகள் என்றும் அறிவோம். அயனி வாயிலிருந்து வெளிவரும் எல்லாத் துகள்களுமே இசைவுறு துகள்களாக அமைவது இயலாது. பல்வேறு கலைக்கோணங்களுடன் துகள்கள் முடுக்கச் சாதனத்தை நாடலாம். பொறியில் இயங்கியபின் வெளிவரும் எல்லாத் துகள்களும் சீரான ஆற்றல் பெறுமாறு செய்வது இன்றியமையதது ஆகின்றது.

எனவே, இசைவுறுத் துகளின் இயக்கத்தைச் சீரமைக்க வேண்டி யுள்ளது. ஒவ்வொரு முறையும் முடுக்கச் சாதனத்தை நாடும்போது இசைவுறு துகள் பெறும் ஆற்றலையே, இசைவுறுத்துகள் பெற வேண்டும் என்ற கட்டாயம் இல்லை. பல சுற்றுகளுக்குப் பின்னால் இசைவுறுத்துகள் ஈட்டும் சராசரி ஆற்றல் இசைவுறு துகளின் இறுதி ஆற்றலுக்குச் சமமானாலே போதுமானது.

காட்டாக, இசைவுறுத் துகளானது ஒரு முறை முடுக்கச் சாதனத்தை அணுகி இசைவுறு துகளைவிட அதிகமாக ஆற்றல் பெறுவ தாகவும், இரண்டாம் முறை முடுக்கச் சாதனத்தை அணுகி இசைவுறு துகளைவிடக் குறைந்த ஆற்றல் பெறுவதாகவும் அமையலாம். எனவே, சராசரியாக இந்தத் துகளின் ஆற்றல் இசைவுறு துகளுக்குரிய ஆற்றலாக மாற வாய்ப்புண்டு. இந்தக் கலைக்கோண நிலைப்பாடு தத்துவத்தைப் பற்றித் தெளிவாகப் புரிந்து கொள்ள, நேரியல் முடுக்கியில் துகளின் இயக்கம் பற்றி ஆராயலாம்.

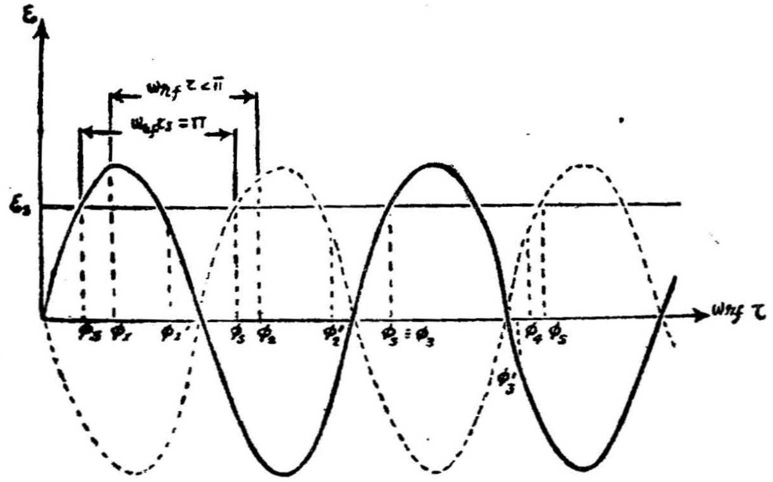
நேரியல் முடுக்கிகளில் நகர்வு குழாய்களின் உள்ளே துகள் இயங்கும்போது மின்புல ஆதிக்கம் இல்லை. ஆனால், ஒரு நகர்வு குழாயை விட்டு அடுத்த நகர்வு குழாயினுள் நுழையும் முன்பாக, இடைவெளியில் மின்புலத்தைக் கடக்கும். நகர்வு குழாய் ஒன்றைக் கடக்க துகள் τ நேரம் எடுத்துக் கொள்வதாகக் கருதுவோம். அலைவானின் ரேடியோ அதிர்வெண்ணை ω_{rf} என்போம். 'n' இடை வெளிகளைக் கடந்த பின்னால், மற்றுமொரு இடைவெளியைத் துகள் கடக்கும்போது அதன் கலைக்கோணம் ϕ எனில்

$$\phi = \omega_{rf}\,\tau - n\pi \qquad (2.57)$$

ஆகும். முடுக்கத்தின் தொடக்கம் முதல் இடைவெளியில் கருதப் பட்டது. எனவே $0 \leq \phi < \pi$ எனக் கிடைக்கும்.

துகள் முடுக்குகின்ற மின்புலத்தைக் கடக்கும்போது உள்ள ϕ-ன் மதிப்பு மட்டுமே நமக்குத் தேவையானதாகும். நகர்வு குழாய்களின் உள்ளே துகள் இயங்கும் காலம் τ-ல் துகள் பெற்றுள்ள ϕ-ன் மதிப்பு தேவையில்லை. ஒவ்வொரு முறையும் இடைவெளியை அணுகும்போதும் இசைவுறு துகள்களின் கலைக்கோணம் ϕ_s எனக் கொள்வோம். அக் கணத்தில் மின் புலத்தின் மதிப்பு ε_s ஆகக் கொள்வோம். பிற துகள்களின் கலைக்கோணம் ϕ_s - ஐ விடக் குறை வாகவோ அல்லது அதிகமாகவோ இருக்கும். இந்தத் துகள்கள் இசைவுறு துகள்களுக்குப் பிந்தியோ அல்லது முந்தியோ இடை வெளியை நாடலாம். இடைவெளிகளைக் கடக்கும் போதெல்லாம் இவற்றின் கலைக்கோணம் மாறுபடும். எனவே, இசைவுறுத் துகள்கள் ஒவ்வொரு முறையும் பெறும் ஆற்றலும் மாறுபடும். எனவே,

இசைவுறுத் துகளானது கலைக்கோண நிலைப்பாடற்ற தன்மை யடையும் இதைத் தவிர்ப்பது எப்படி என்பதைக் காண்போம்.



படம் 2.9 நேரியல் பொறியில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு

$0<\phi_s<\pi$ என்று ϕ_s - ன் மதிப்பைக் கொள்ளலாம். எனவே, காலத்தையொட்டி மின்புலம் உயரும்போது இசைவுறு துகள்கள் இடைவெளியை நாடி முடுக்கம் பெறுகின்றன. இனி, இசைவுறு துகளுக்குப் பிந்திவரும் இசைவுறுத் துகளைக் கருதுவோம். இத்துகளின் கலைக்கோணம் $\phi_1>\phi_s$ எனக் கொள்வோம். ஆகவே, இந்த இசைவுறுத் துகளானது $\mathcal{E}_s$ – ஐ விட மதிப்பு மிகுந்த மின்புலத்திற்கு உட்படுகின்றது. எனவே, இத் துகள் இசைவுறு துகளைவிட அதிக முடுக்கம் பெறும். எனவே இரண்டாம் இடைவெளியை அடைய இசைவுறு துகளைவிடக் குறைந்த நேரமே இந்தத் துகளுக்குப் போது மானதாகும். ஆகவே, இரண்டாம் இடைவெளியில் இந்தத் துகளின் கலைக்கோணம் ϕ_2 ஆகும் (படம்2.9). இந்த ϕ_2, ϕ_s–க்கு நெருக்கமாக அமைவதைப் படத்தில் காணலாம்.

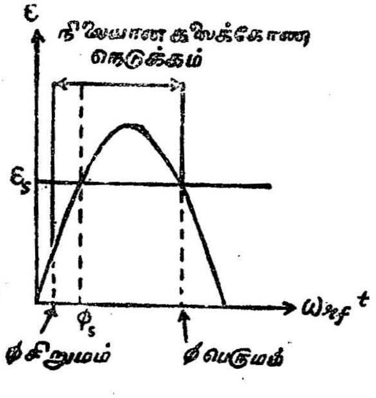
இரண்டாம் நகர்வு குழாயைக் கடக்க இசைவுறு துகள் τ_s நேரமும், அதற்குப் பிந்தி வரும் இசைவுறுத் துகள் τ நேரமும் எடுத்துக் கொள்வதாகக் கருதுவோம். எனவே, $\omega_{rf}\tau_s=\pi$, $\omega_{rf}\tau<\pi$ என்றமையும். இசைவுறு துகளுக்கும் இசைவுறுத் துகளுக்கும் இடையே உள்ள வேறுபாடு நீங்கும்வரை இத்தகு ஆற்றல் மாற்றங்கள் நிகழும். காட்டாக, மூன்றுவது இடைவெளியில்

$\phi_s \equiv \phi_3$ என்று கொள்ளலாம். எனவே, இந்த மூன்ருவது இடைவெளியில் இசைவுறு துகளும், இசைவுருத் துகளும் ஒரே அளவுள்ள ஆற்றலைத்தான் ஈட்டும். நாம் கருதுகின்ற இசைவுருத் துகள் இதற்கு முன்னரே இசைவுறு துகளைவிட அதிகம் ஆற்றல் பெற்றிருக்கின்றது. இதனுல் நான்காம் இடைவெளியை நாடும்போது இசைவுருத்துகள் இசைவுறு துகளை முந்தும். நான்காம் இடைவெளியில் இசைவுருத் துகளின் கலைக்கோணம் ϕ_4 எனில் (படம் 2.9) இந்தத் துகள் இசைவுறு துகளைவிடக் குறைந்த ஆற்றலே பெறும். ஆகவே, மேலும் சில இடைவெளிகளைக் கடந்தபின் வேகம் குறைந்துவிடுவதால், இசைவுறு துகளின் கலைக்கோணத்துடன் இசைவுருத் துகளின் கலைக் கோணம் மீண்டும் பொருந்தும்.

எனவே, இசைவுருத்துகளின் கலைக்கோணம் இசைவுறு துகளின் கலைக்கோணத்தை விட்டு விலகியும், அணுகியும், பொருந்தியும் அலைவுகளுக்கு உட்படும். இதன்பயனுக இந்த இசைவுருத்துகள் கலைக்கோண நிலைப்பாட்டிற்கு உட்படும்.

இனி, அயனி வாயிலிருந்து வெளிவரும் அயனிகளில், சில அயனிகள் இசைவுறு துகள்களைப் பிந்தியும் வரலாம். இந்த இசைவுருத் துகளின் கலைக்கோணம் முதல் இடைவெளியில் நுழையும்போது ϕ'_1 எனக் கொள்ளலாம். எனவே, இந்தத் துகளின் கலைக் கோணங்கள் ϕ'_2, ϕ'_3 எனக் குறைந்துகொண்டே போகும் (படம் 2.9). எனவே இத்தகு இசைவுருத்துகள் சராசரியாக ஆற்றல் எதையும் ஈட்டாது.

நேரியல் முடுக்கியில் இடைவெளியொன்றில் அமைந்த மின்புல இயல்பை படம் 2.10 - விளக்குகின்றது. மேலும், நிலையான கலைக் கோண நெடுக்கத்தைத் (*Stable-Range of Phases*) தீர்மானிக்கவும் இவ் வரைபடம் பயன் படும். ϕ_s-ன் மதிப்பை நிறுவிவிட்டோமானுல் பயனுள்ள கலைக்கோணங்களின் எல்லையானது $\pi - \phi_s$ மதிப்புடைய, ϕ பெருமத்திலிருந்து, ϕ சிறுமம் வரை பரவியிருக்கும். பொறியுள் இயங்குகின்ற துகளின் கலைக்கோணம் இந்த எல்லைக்குள் அடங்காவிட்டால், அலைவின் போது துகள் நிலைப்பாடு பெருது.



படம் 2.10
நிலையான கலைக்கோண நெடுக்கம்

இசைவுறு துகள் மின்புலத்தைச் சந்திக்கும் போது உள்ள புலமதிப்பு $\mathcal{E}_s$ எனக்கொள்வோம். உச்சமதிப்பிற்கு நெருக்கமாக $\mathcal{E}_s$ அமையுமெனில் (படம் 2.10) பயனுள்ள கலைக்கோண எல்லை மிகவும் குறுகிவிடும். இது துகளின் இயக்கத்திற்கு ஏற்றதன்று. $\mathcal{E}_s$ மிகக் குறைந்ததாகவும் அமையக்கூடாது. பெரும்பாலும் உச்சமதிப்பில் (*Peak value*) பாதியாக இருக்குமாறு $\mathcal{E}_s$ தேர்ந்தெடுக்கப்படும். இதற்குரிய ϕ_s-ன் மதிப்பு 30° யாகும். எனவே, இத்தகு ϕ_s-ன் மதிப் பின்படி அமையும் பயனுள்ள கலைக்கோண எல்லையை நிறுவவேண்டும். இந்த எல்லையுள் அடங்கும் கலைக்கோணம் உடைய துகளே நிலைப்பாடு பெறும்.

2.12. கலைக்கோண நிலைப்பாடும் உந்த இறுக்கமும்
(Phase Stability and Momentum Compaction)

முடுக்கும் பொறியின் அமைப்பில் உந்த இறுக்கம் எனப்படும் பயனுறு கருத்து பெரும்பங்கு வகிக்கின்றது. காந்தப்புலத்தில் வெவ் வேறு உந்த மதிப்புகளுக்கு ஏற்ப அமையும் நடுநிலைத் தடங்கள் எவ்விதம் செறிந்துள்ளன என்பதைத் தீர்மானிக்க உந்த இறுக்கம் பெரிதும் பயன்படும்.

சைக்ளோட்ரான் போன்ற வட்டப் பொறிகளில் ஆற்றல் பெற்றுத் துகள்கள் சுருள்பாதையில் இயங்குவதால், துகளியங்கும் பாதையின் ஆரம் பெருகிக் கொண்டே போகும். எனவே, துகளின் ஆற்றல் பெருகப் பெருக அதன் பாதையின் நீளமும் மிகுதியாகும்.

இவ்வாறு, துகளின் வெவ்வேறு உந்த மதிப்புகளுக்கு ஏற்ப அமையும் இரு தடங்கள் மிக நெருக்கமாக இறுக்கப்பட்டு இருப்ப தாகக் கருதலாம். எனவே, இவ்விரு தடங்களின் சுற்றளவுகளுக் கிடையே மிகுந்த வேறுபாடு இருக்காது. இவ்விதம் அமையும்போது உந்த இறுக்கமானது பெரும் மதிப்பைப் பெற்றிருக்கும். மேலும் அடுத்தடுத்த தடங்களை ஒரே அளவு நீளமுடையனவாகக் கொள்வ தால், முதல் சுற்றில் வேகம் மிகுத்து கொண்டே வரும் துகள், இரண்டாம் சுற்றை முடிக்கக் குறைந்த நேரமே எடுத்துக்கொள்ளும்.

ஆனல், இருவேறுபட்ட உந்தங்களுக்கு ஏற்ப அமையும் இரு தடங்களின் சுற்றளவுகளுக்கிடையே குறிப்பிடத்தக்க வேறுபாடு இருக்குமெனில், உந்த இறுக்கம் சிறியதாக அமைந்துவிடும். இச் சூழ்நிலையில் வேகம் மிகுந்த துகளுக்கு நீண்ட பாதையும், வேகம் குறைந்த துகளுக்கு சிறிய பாதையும் அமையும். எனவே, வேகம் மிகுந்த துகள் ஒரு சுற்றை முடிக்க நீண்ட நேரம் எடுத்துக்கொள்ளும்.

மேற்சொன்ன இருவகையிலும் அமையாமல் மற்ருெரு முறையிலும் துகள் இயங்கும் வாய்ப்புண்டு. வேகம் மிகுந்த துகளானது நீண்டபாதையில் இயங்க எடுத்துக் கொள்ளும் நேரமும், வேகம் குறைந்த துகள் சிறிய பாதையில் இயங்க எடுத்துக் கொள்ளும் நேரமும் ஒன்ருகவே அமையவும் வாய்ப்புண்டு. இந் நிலையில் துகளின் வேகமிகுதியினுல் தோன்ற வேண்டிய மாற்றமானது, பாதையின் நீளமிகுதியால் விலக்கப்படுகின்றது என்பதை உணர்க.

குறிப்பிட்ட ஒரு முடுக்கிக்கு நாம் கண்ட மூன்று வகையான தட அமைப்புகளில் உகந்தது எது என்பதைத் தீர்மானிக்க உந்த இறுக்கம் பெரிதும் பயன்படும்.

p உந்தமுடைய துகள் L நீளமுடைய தடத்திலும், $p+dp$ உந்தமுடைய துகள் $L+dL$ நீளமுடைய தடத்திலும் இயங்குமெனில், உந்த இறுக்கம்,

$$a = \frac{dp/p}{dL/L} \qquad (2.58)$$

ஆகும். 'p' உந்தமுடைய துகள் r-ஆரமுடைய வட்டத் தடத்திலும், $p+dp$ உந்தமுடைய துகள் $r+dr$ ஆரமுடைய வட்டத் தடத்திலும்

இயங்குமாஞல், $$\frac{dL}{L} = \frac{dr}{r} \qquad (2.59)$$

என்ருகும். எனவே, உந்த இறுக்கம்,

$$a = \frac{dp/p}{dr/r} \qquad (2.60)$$

ஆகும்.

இனி, உந்த இறுக்கத்திற்கும் புல எண்ணிற்கும் இடையேயான தொடர்பைப் பெறுவோம். வட்ட மென்குவிப்புப் பொறி ஒன்றில் p உந்தமுடைய துகள், r ஆரமுடைய வட்டத் தடத்தில் இயங்குவதாகக் கருதலாம். இத் தடத்தின் நீளம் $L=2\pi r$ ஆகும். இதே பொறியினுள் $p+dp$ உந்தமுடைய துகள் ஒன்றைச் செலுத்துவோமெனில், அது $r+dr$ ஆரமுடைய தடமொன்றில் இயங்குவதாகக் கொள்ளலாம். இந்தத் தடத்தின் நீளம் $L+dL = 2\pi(r+dr)$ ஆகும்.

$$\therefore \quad \frac{dL}{L} = \frac{dr}{r} \qquad (2.61)$$

துகளின் நிறை M எனவும், மின்னூட்டம் q எனவும், செயற்படும் காந்தப் புலம் B எனவும் கொள்வோமாயின்,

$$Mv = p = qBr \tag{2.62}$$

என்றாகும்.

எனவே,
$$dp = q\,(rdB + Bdr)$$

$$\therefore \quad \frac{dp}{p} = \left(\frac{dB}{B} + \frac{dr}{r}\right) \tag{2.63}$$

மேலும், புல எண் $n = -\dfrac{dB/B}{dr/r}$ ஆதலால்,

$$\frac{dB}{B} = -\,n\frac{dr}{r} \tag{2.64}$$

ஆகும். இதன் பயனாகச் சமன் 2.63 ஐ

$$\frac{dp}{p} = \frac{dr}{r}\,(1-n) \tag{2.65}$$

என்று எழுதலாம்.

$$\therefore \quad a = \frac{\frac{dr}{r}\,(1-n)}{dr/r}$$

அல்லது,
$$a = (1-n) \tag{2.66}$$

இச் சமன், புல எண்ணிற்கும் உந்த இறுக்கத்திற்கும் இடையேயான தொடர்பை நிறுவுகின்றது. சைக்ளோட்ரான் போன்ற மென் குவிப்புப் பொறியில், மையத்தில் புலம் சீரானதாக இருந்தாலும், மையத்தை விட்டு விலகிச் செல்லச் செல்ல குறையத் தொடங்கும். காட்டாக, சைக்ளோட்ரானின் இறுதி ஆரத்தில் (*Final Radius*) புல எண் மதிப்பு $n = 0{\cdot}3$ என்ற அளவில் அமையும். எனவே, சமன் 2.66ன் படி $a = 0{\cdot}7$ ஆகும். a- ன் மதிப்பு மிகக் குறைவாக அமைவதால், உந்தத்தில் ஏற்படும் சிறு மாற்றமும் தடஆரத்தில் பெரும் மாற்றங்களை உருவாக்கும். இதன் பயனாக இப் பொறியில் துகளியங்கும் தடம் சுருள்வடிவம் பெறும்.

மென்குவிப்பு சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் $n = 0.6$ ஆகும். எனவே, இப் பொறிகளில் $a = 0{\cdot}4$ ஆகும். நேரியல் முடுக்கியில் எல்லாத் துகள்களும் ஒரே பாதையில் இயங்குகின்றன. எனவே $dL = 0$ ஆகும். இதனால் இப் பொறியில் $a = \infty$ ஆகும்.

இனி, கலைக்கோண நிலைப்பாட்டிற்கு உந்த இறுக்கம் எவ்வகையில் துணை நிற்கும் என்பதைக் காண்போம். p உந்தமுடைய துகள் L நீளமுடைய தடத்தை τ நேரத்தில் v வேகமுடன் கடப்பதாகக் கருதுவோமெனில்
$$\tau = \frac{L}{v} \tag{2.67}$$

$$\therefore \ln \tau = \ln L - \ln v \tag{2.68}$$

சமன் 2.68- ஐப் பகுதி காணில்

$$\frac{d\tau}{\tau} = \frac{dL}{L} - \frac{dv}{v} \qquad (2.69)$$

என்றாகும். $\beta = \frac{v}{c}$ ஆதலால்,

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{dv}{v}$$

ஆகும்.

$$\therefore \quad \frac{d\tau}{\tau} = \frac{dL}{L} - \frac{d\beta}{\beta} \qquad (2.70)$$

துகளின் ஓய்வு நிலை ஆற்றல் E_0 எனவும், p உந்தமுடன் இயங்கும் போது ஆற்றல் E எனவும் கொண்டால், $\beta = \left(1 - \frac{E_0^2}{E^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ என்று அறிவோம்.

மேலும், $$E^2 = E_0^2 + p^2c^2 \qquad (2.71)$$

ஆதலால், $$\beta = \left(\frac{p^2c^2}{E_0^2 + p^2c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2.72)$$

ஆகவே, $$d\beta = \frac{(E_0^2 + c^2p^2)c\,dp - c^3p^2dp}{(E_0^2 + p^2c^2)^{3/2}}$$

அல்லது $$d\beta = c\frac{[\{(E_0^2 + c^2p^2) - (c^2p^2)\}dp]}{(E_0^2 + p^2c^2)^{3/2}}$$

சமன் 2.72 லிருந்து,

$$\therefore \quad \frac{d\beta}{\beta} = \frac{\{(E_0^2 + c^2p^2) - c^2p^2\}dp}{p(E_0^2 + c^2p^2)}$$

எனவே, $$\frac{d\beta}{\beta} = \left(1 - \frac{c^2p^2}{E_0^2 + c^2p^2}\right)\frac{dp}{p} \qquad (2.73)$$

சமன் 2.72-லிருந்து $$\frac{d\beta}{\beta} = (1 - \beta^2)\,\frac{dp}{p}$$

இதில், $(1 - \beta^2) = \frac{1}{\gamma^2}$ எனக் குறிப்போமானால்,

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{1}{\gamma^2}\,\frac{dp}{p} \qquad (2.74)$$

ஆகும். சமன்கள் 2.70, 2.74 -லிருந்து,

$$\frac{d\tau}{\tau} = \frac{dL}{L} - \frac{d\beta}{\beta}$$

ஆனால், சமன் 2.58லிருந்து $\frac{dL}{L} = \frac{dp/p}{a}$ ஆதலால்,

$$\frac{d\tau}{\tau} = \frac{dp/p}{a} - \frac{1}{\gamma^2}\frac{dp}{p}$$

$$\therefore \quad \frac{d\tau}{\tau} = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{\gamma^2}\right)\frac{dp}{p} \qquad (2.75)$$

ஆகும்.

சமன் 2.75 கடக்குங் காலத்திற்கும் (*Transit time*) உந்த மாறுபாட்டிற்கும் இடையிலுள்ள தொடர்பைக் குறிக்கின்றது. இசைவுறு துகளின் உந்தம் p எனவும் இசைவுறாத் துகளின் உந்தம் $(p+dp)$ எனவும் கொண்டு சமன் 2.75-லிருந்து நிலைப்பாட்டிற்குரிய விதிகளை ஆராயலாம்.

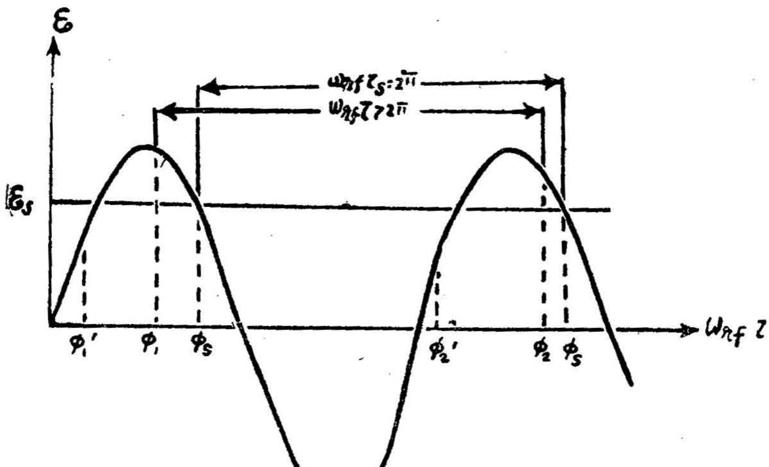
நேரியல் முடுக்கிகளில் $a = \infty$ எனவே $d\tau/\tau$ ஆனது எப்பொழுதும் dp/p க்கு எதிரான குறியைப் பெற்றிருக்கும். எனவே உந்தம் அதிகரிக்க அதிகரிக்கக் கடக்குங் காலம் குறையும் என்று அறியலாம்.

சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் a மிகவும் சிறியதாகும். $\frac{1}{\gamma^2} < 1$ எனவே, $d\tau/\tau$வும் dp/p யும் ஒரே குறி உடையனவாகும். ஆகவே, இப் பொறிகளில் உந்தம் அதிகரிக்க அதிகரிக்கக் கடக்குங் காலம் அதிகரிக்கும் எனலாம். இரு வாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரானில் (*Alternate Gradient Synchrotron*) குறிப்பிட்டதொரு ஆற்றலுக்கு $a = \gamma^2$ என அமையும். இந் நிலையில் $\frac{d\tau}{\tau}$ சுழியமாகும். எனவே இத்தகு நிலை நீடிக்குமெனில், கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவாததுடன் துகள்கள் இழந்து போக வாய்ப்புண்டு. a வை γ^2க்குச் சமம் ஆக்குகின்ற துகளின் ஆற்றலுக்குத் திரிவுநிலை ஆற்றல் (*Transition Energy*) என்று பெயர். இதைப் பற்றிப் பின்னர் விரிவாகக் காண்போம்.

நேரியல் பொறிகளில் $a > \gamma^2$ எனவும், இதனால் உந்தம் அதிகரிக்க அதிகரிக்க அடுத்தடுத்து முடுக்கச் சாதனத்தைச் சந்திப்பதற்கு இடைப்பட்ட காலம் குறையுமென்றும், இதனால் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவ $0 < \phi_s < \pi/2$ -ஆக அமையவேண்டும் என்றும்

கண்டோம். சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் $a<\gamma^2$ எனக் கண்டோம். இனி, இந்தச் சிங்க்ரோட்ரானில் நிலைப்பாட்டிற்குரிய கலைக்கோணம் என்னவென்று காணலாம்.

சிங்க்ரோட்ரானில், அதிர்வெண் உட்குழிவில் உள்ள மின்புல இயல்பையும், இசைவுறுத் துகளொன்று கலைக்கோண நிலைப் பாட்டைப் பெறுவதையும் படம் 2.11-ல் காணலாம். நேரியல் முடுக்கியில் அமைவதைப்போல் இசைவுத் துகளின் இயக்கம் இப் பொறியில் அமைவதில்லை. $a<\gamma^2$ என்பதால் ஆற்றல் உயரஉயரக்



படம் 2.11 சிங்க்ரோட்ரானில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு

கடக்குங் காலமும் அதிகரிக்கின்றது. எனவே, கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவ $\pi/2<\phi_s<\pi$ என்று நிலவ வேண்டும்.

2.13. முடிவுரை

இதுகாறும் கூறியவற்றால் துகள் இயக்கத்தில் சார்பியல் கொள்கை காரணமாகக் காணப்பெறும் புதுமைகளாக, துகளின் வேகம் அதிகரிக்க அதிகரிக்க அதன் நிறையில் ஏற்படும் மாற்றமும், துகளின் வேகத்திற்கும் ஒளியின் வேகத்திற்கும் இடையேயான தொடர்பும் விளங்குகின்றன.

காந்தப் புலத்தின் அமைப்பில் புலஎண் என்னும் ஒரு கருத்து புலத்தை அமைப்பதற்குத் துணைசெய்கிறது எனக் கண்டோம்.

துகளின் நடுநிலைத் தடத்தை ஒட்டிய பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் கெர்ஸ்ட்-செர்பர் சமன்பாடுகளால் விளக்கப்படுவதையும், அதன் காரணமாகக் காந்தப் புலத்தின் புலஎண் சுழியம்முதல் ஒன்றுவரை இருக்கவேண்டும் என்பதையும் கண்டோம்.

அடுத்து, கலைக்கோணம் பற்றிய நிலைப்பாடு கருதப்பட்டது. இக் கருத்து, துகள் பொறிகள் வரலாற்றில் சிறந்த இடம் பெறுகிறது எனக் கண்டோம். இக் கலைக்கோண நிலைப்பாட்டை நேரியல் பொறியில் எவ்வாறு நிறுவுகிறோம் எனவும் விளக்கம் பெறப்பட்டது. மேலும், வேகமாகச் செல்லும் துகள்களின் உந்தம் பற்றிய ஆய்வில், உந்த இறுக்கம் எனப்பட்டதொரு கருத்தின் அவசியத்தையும், கலைக்கோண நிலைப்பாட்டுடன் அது எவ்வாறு தொடர்பு கொண்டுள்ளது என்பதையும் அறிந்தோம். துகள் பொறிகளின் அமைப்பில் இக் கருத்துகள் எல்லாம் கருதப்பட வேண்டும் என்பதை நினைவில் இருத்துதல் இன்றியமையாதது ஆகும்.

3. முதற்பொறிகள்

3.1. முன்னுரை

கடந்த அத்தியாயத்தில் கண்டவாறு மின்னூட்டமுடைய துகள்கள் மின்புலத்திலோ அல்லது காந்தப் புலத்திலோ இயங்கு மெனில், அவ்வப் புலப்பண்பிற்கேற்ப அவற்றின் இயக்கம் அமையும் என்பது தெளிவு. துகளின் நிறை, மின்னூட்டம் இவற்றைத் தீர்மானிக்க, தாம்சன் நடத்திய ஆய்வுகள், புலப்பண்பிற்கேற்ப அமையும் துகளின் இயக்கம் பற்றி ஆராயப் பெரிதும் உதவின. மின்புலத்தின் ஊடே துகள் இயங்கும்போது முடுக்கம் பெறும் எனவும், காந்தப்புலத்தினூல் துகளின் பாதை நெறிப்படுத்தப்படும் எனவும் அறிய இந்த ஆய்வுகள் துணைநின்றன.

தவிர *X* - கதிர்களை உருவாக்க எழுந்த முயற்சியிலும், பெரும் மின்னழுத்த வேறுபாட்டை உருவாக்கி, எதிர்மின்வாயை விட்டு வெளிவரும் எலெக்ட்ரான்களை முடுக்கம் பெறச் செய்யலாம் என்ற உண்மையும் தெளிவு பெற்றது.

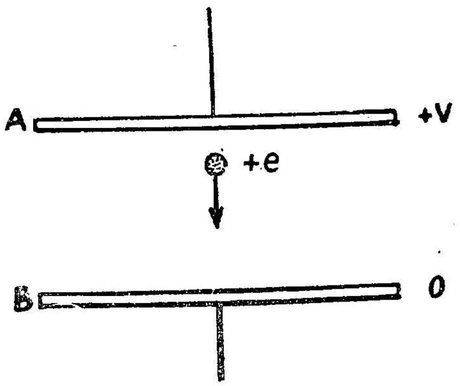
இவ்விதம் துகள்களை முடுக்க நடந்த முயற்சிகளின் வளர்ச்சியாக, வாண்டிகிராஃப் இயற்றியென்னும் நேர்மின்னழுத்தப் பொறி தோன்றியது. மிகக் குறைந்த மின்னழுத்தத்திலிருந்து பெரும் அளவிலான மின்னழுத்தம் பெற இப்பொறி துணைநின்றதுடன், அணு இயற்பியல் வரலாற்றில் அணுக்கரு மாற்றங்களை விளைவிக்க-வல்ல துகள்களையும் உருவாக்கிற்று.

அடுத்தபடியாக, காக்ராஃப்ட் வால்டன் பொறி என்னும் பொறியினூல் ஆயிரக்கணக்கான வோல்ட்வரை பெற முடிந்தது. இதன் துணையினூல் பெறப்பட்ட ஆற்றல் மிகுந்த புரோட்டான்களைக் கொண்டு, போரான் (*Boron*) லித்தியம் (*Lithium*) முதலிய தனிமங்களில், முதன் முதலாகச் செயற்கை அணுக்கரு மாற்றங்கள்

(Artificial Transmutation) தூண்டப்பட்டன. இயற்கையான அணுக்கரு மாற்றங்கள் தவிர, மனிதனாலும் அணுக்கரு மாற்றங்களைத் தோற்றுவிக்க முடியும் என்பதற்கு இதுவே முதல் எடுத்துக்காட்டாக அமைந்தது.

இவ்விரு முடுக்கிகளைத் தவிர மின்னழுத்தப் பெருக்கி *(Voltage Multiplier)*, காஸ்கேட் மின்மாற்றி முதலியவையும் மின்னழுத்தத்தைப் பெருக்க உதவின. இத்தகு அமைப்புகள் எல்லாம் முடுக்கும் பொறி வரலாற்றின் முன்னோடிகள் எனலாம். இவை பிற முடுக்கிகள் யாவற்றிற்கும் முன்னரே வளர்ந்தவை ஆதலால், இவற்றை முதற் பொறிகள் என்றே அழைக்கலாம்.

மின்னூட்டமுடைய துகள் ஒன்று மின்புலத்தினால் பெறும் இயக்கமே எல்லா முடுக்கிகளுக்கும் அடிப்படையான தத்துவமாகும்.



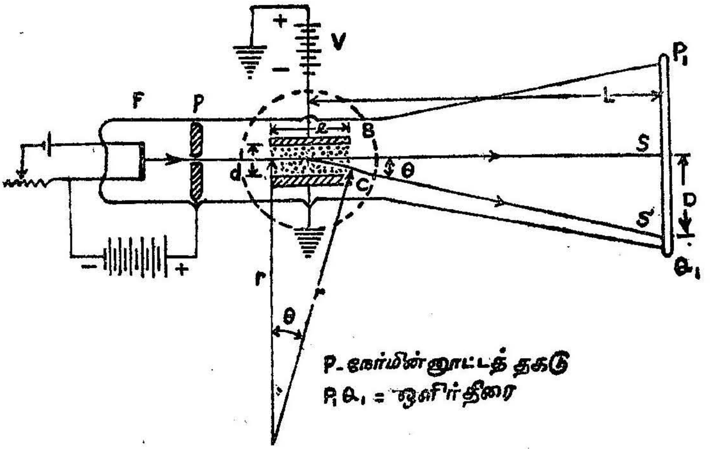
படம் 3.1 மின்புலத்தில் துகள் இயக்கம்

படம் 3.1-ல் உள்ளவாறு இரு தகடுகளுக்கிடையில் மின்புலமொன்று செயற்படலாம். இவ்விரு தகடுகளுள் ஒன்று (A) நேர் மின்னூட்டம் பெற்றும், மற்றொன்று (B) தரையுடன் இணைக்கப்பட்டிருப்பதாகவும் கொள்வோம். புரோட்டான் போன்ற நேர்மின்னூட்டமுடைய துகள் A தகட்டால் விலக்கப்படும்; எனவே B தகட்டை நோக்கி முடுக்கப்படும். இரு தகடுகளுக்குமிடையில் உள்ள மின்னழுத்த வேறுபாடு V வோல்ட்டுகள், புரோட்டானின் மின்னூட்டம் q எனில் புரோட்டான் பெறும் இயக்கஆற்றல் qV ஆகும். இவ்வாறாக, மின்னூட்டமுடைய எந்தத் துகளையும் குறிப்பிட்டதொரு மின்னழுத்த வேறுபாடுடைய தகடுகளுக்கிடையில் முடுக்கம்பெறச் செய்யலாம். இந்தத் தத்துவத்தைப் பயன்படுத்தி, தாம்சன்

(Thomson) என்னும் அறிவியலாளர் துகள்களை முடுக்கி, அவற்றின் மின்னூட்டம், நிறை இரண்டிற்குமிடையே உள்ள விகிதத்தை மதிப்பிட்டார். இதுவே முடுக்கும் பொறிகளின் வரலாற்றில் முதல் முயற்சியாகும்.

3.2. தாம்சனின் முறை

1897-ஆம் ஆண்டில் தாம்சன் கையாண்ட முறையில் மின்புலம் காந்தப்புலம் இரண்டிலும் எலெக்ட்ரான்களின் இயக்கம் ஆராயப் பட்டது. தாம்சன் கையாண்ட கருவியின் அமைப்பைப் படம் 3.2-ல் காணலாம். F என்பது எலெக்ட்ரான் தோற்றுவாயாகச் செயற்படும்



படம் 3.2 தாம்சன் முறை

சூடேற்றப்பட்ட ஓர் உலோக இழை. P என்பது நேர் மின்னூட்டம் பெற்ற ஒரு தகடு. B, C, என்பவை எலெக்ட்ரான் கற்றைக்கு நேர் குத்துத் திசையில் மின்புலம் ஒன்றை உருவாக்கப் பயன்படும் தகடு களாகும். இம் மின்புலத்தைத் தவிரப் படத்தளத்திற்கு நேர்குத்தான திசையில் காந்தப் புலம் ஒன்றையும் உருவாக்குவதற்கான அமைப்பு உள்ளது. P_1 Q_1 என்பது ஓர் ஒளிர்திரை. F-லிருந்து தோன்றும் எலெக்ட்ரான்கள் P-ஐ நோக்கி முடுக்கம்பெறும். இவ்வாறு முடுக்கம் பெற்ற எலெக்ட்ரான்களுள் சில P-ல் உள்ள துளைவழியே வெளியேறி ஒளிர்திரையை அடையும்.

B, C க்கிடையே மின்புலம் ஏதும் செயற்படாத நிலையில், எலெக்ட்ரான் கற்றை நேர்கோட்டில் சென்று, திரையை S என்ற

புள்ளியில் சந்திக்கும். திரை ஒளிர்பொருள் பூச்சுடையதாதலால் எலெக்ட்ரான்கள் திரையில் ஓர் ஒளிப்புள்ளியைத் தோற்றுவிக்கும். ஆனால், படத்தில் காட்டியுள்ளவாறு B, C க்கிடையே காந்தப்புலம் ஒன்று உருவாக்கப்படுமானால், காந்தப் புலத்தினூடே துகளியங்கும் போது, அதன் பாதை வட்டப் பாதையாக அமையும். துகள், காந்தப் புலத்தை விட்டு விலகியபின், வட்டப் பாதையின் தொடுகோட்டுத் திசையில் சென்று திரையை S′ என்ற புள்ளியில் சந்திக்கும்.

இனி, P வழியே வெளியேறும் எலெக்ட்ரானின் நிறை M, மின்னூட்டம் q, வேகம் v எனவும், காந்தப் புலவலிமை B, காந்தப் புலத்தில் துகள் பாதையின் ஆரம் r எனவும் கொள்வோம். எலெக்ட்ரான் காந்தப்புலத்தில் இயங்கும்போது Bqv என்ற காந்த விசைக்கு உள்ளாகும். இந்த விசையானது மையவிலக்கு விசை $\frac{Mv^2}{r}$ க்குச் சமமாகும்.

ஆகவே,
$$Bqv = \frac{Mv^2}{r} \qquad (3.1)$$

$$\therefore \frac{q}{M} = \frac{v}{Br} \qquad (3.2)$$

காந்தப்புலம் செயற்படும் பகுதியின் நீளம் l, SS′ $= D$, காந்தப் புல மையத்திலிருந்து திரையின் தொலைவு L, துகள் கற்றை விலகும் கோணம் θ எனில்

$$Sin\ \theta = \frac{l}{r}$$

$$= \frac{D}{\sqrt{D^2 + L^2}}$$

$$\therefore r = l\sqrt{1 + \frac{L^2}{D^2}} \qquad (3{\cdot}3)$$

அடுத்து B, Cக் கிடையே நிலைமின்புலம் ஒன்றைச் செயற்படுத்துவதன் மூலம் காந்தத்தினால் பாதை விலகிய துகளை மீண்டும் பழைய நிலைக்கே கொண்டு வரலாம். B, C என்ற தகடுகளுக் கிடையே உள்ள தொலைவு d, மின்னழுத்த வேறுபாடு V_m, மின்புலச் செறிவு $\mathcal{E}$ எனக் கொள்வோமாயின், மின்புலம் எலெக்ட்ரான்மீது செயற்படுத்தும் விசை $\mathcal{E}q$ ஆகும். காந்தப் புலம், மின்புலம் ஆகியவற்றின் ஒருங்கிணைந்த செயற்பாட்டால் துகள் பழைய நிலையிலேயே இயங்குவதால்,

$$\varepsilon q = Bqv \tag{3.4}$$

$$\therefore\ v = \frac{\varepsilon}{B}$$

ஆனால்,

$$\varepsilon = \frac{V_m}{d}$$

எனவே,

$$v = \frac{V_m}{Bd} \tag{3.5}$$

B, C-க்கு இடையே மின்னழுத்த வேறுபாடு V வோல்ட் எனில்,

$$v = \frac{10^8 V}{Bd} \tag{3.6}$$

v-ன் இம் மதிப்பைச் சமன் - (3.2)ல் பதிலீடு செய்வோமாயின்,

$$\frac{q}{M} = \frac{10^8 V}{B^2 r d} \tag{3.7}$$

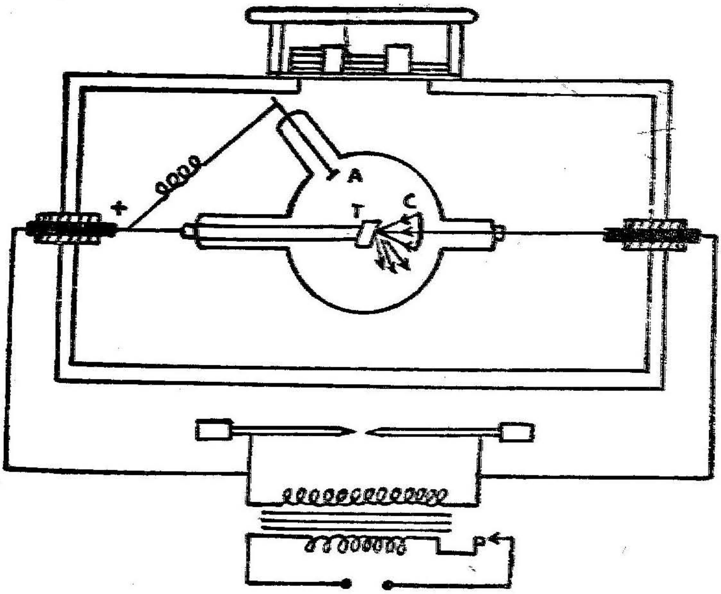
இவ்வாறாக, மின்புலத்தைக் கொண்டு எலெக்ட்ரான்களை முடுக்கியும் காந்தப் புலத்தைப் பயன்படுத்தி அவற்றின் பாதையை விலக்கியும் q/M-ன் மதிப்பு கணக்கிடப்பட்டது. மின்னூட்டம் உடைய துகள்களை மின்புலம் ஒன்றால் முடுக்கலாம் என்பதற்கும், காந்தப் புலத்தால் விலக்கலாம் என்பதற்கும் இம் முறை சிறந்த சான்றாக விளங்குகின்றது.

3.3. X- கதிர்கள் (X - Rays)

முடுக்கும் பொறிகளின் வரலாற்றில் X கதிர்க் குழாய்களும் முக்கிய இடம் வகிக்கின்றன. மிகுந்த வேகமுடன் இயங்கும் எலெக்ட்ரான்களை வாயு மின்னிறக்கக்குழாய் ஒன்றில் முடுக்குவித்து உரிய இலக்கு ஒன்றின்மேல் மோதச்செய்வதன் மூலம் X கதிர்களை உருவாக்கலாம் என நாமறிவோம்.

தொடக்க காலங்களில் எக்ஸ் கதிர்களை உருவாக்க வாயு மின்னிறக்கக் குழாய்களே பயன்படுத்தப்பட்டன. படம் 3.3-ல் எக்ஸ் கதிர்க் குழாயொன்றின் அமைப்பைக் காணலாம்.

படத்தில் A என்பது ஒரு நேர்மின்வாய், C என்பது எதிர் மின்வாய். இவற்றிற்கிடையே மின்னிறக்கம் உருவாக்கத் தேவையான உயர் மின்னழுத்தம் ஒன்று நிறுவப்படும். T என்பது இலக்கு ஆகும். A க்கும் C க்கும் இடையிலுள்ள மின்னழுத்த வேறுபாடு



படம். 3.3 X - கதிர்க்குழாய்

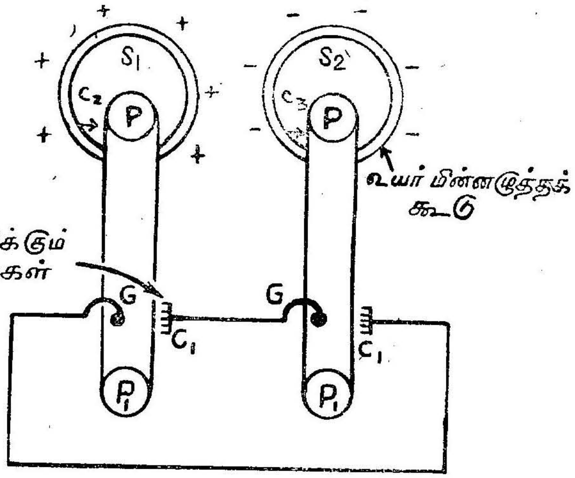
காரணமாக முடுக்கம்பெற்று இயங்கும் எலக்ட்ரான்கள் இலக்கில் மோதி எக்ஸ் கதிர்களைத் தோற்றுவிக்கின்றன.

எலெக்ட்ரானைப் பற்றிய தாம்சனின் ஆய்வு, மற்றும் எக்ஸ் கதிர்க் குழாய் ஆகியவற்றிற்கு அடிப்படையாக அமைந்த தத்துவங்களே முடுக்கும் பொறிகளின் அமைப்பிற்கும் முன்னோடிகளாக அமைந்தன. காக்ராஃப்ட் வால்டன் இயற்றியிலிருந்து இரு வாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான் *(Alternating Gradient Synchrotron)* வரை படிப் படியாக வளர்ந்துள்ள முடுக்கும் பொறிகளின் வரலாறு அறிவியல் வரலாற்றில் மனிதனின் ஓயாத உழைப்புக்குச் சான்றாக விளங்கு கின்றது. இனி, காக்ராஃப்ட் வால்டன் மின்னழுத்தப் பெருக்கி, வாண்டிகிராஃப் இயற்றி முதலிய நிலைமின்னழுத்தப் பொறிகளைப் பற்றிக் காண்போம்.

3.4. வாண்டிகிராஃப் இயற்றி (Vande Graff Generator)

உள்ளீடற்ற கோளக வடிவமுடைய கடத்தி ஒன்றனுள் மின்னூட்டமுடைய கடத்தியொன்று வைக்கப்பட்டுள்ளதாகக் கருதுவோம். மின்னூட்டமுடைய கடத்தியையும், உள்ளீடற்ற

கோளத்தையும் இணைப்போமானால், உள்ளீடற்ற கோளத்தின் வெளிப்பக்கத்தில் மின்னூட்டம் முழுதும் தோன்றும். உள்ளீடற்ற கடத்தி சுற்றுப் புறங்களினின்றும் காப்பிடப்படுமாயின், அதனுடைய மின்னூட்டத்தையும், மின்னழுத்தத்தையும் தேவையான அளவிற்கு உயர்த்தலாம். இதுவே வாண்டிகிராஃப் இயற்றியின் தத்துவமாகும்.



படம் 3.4 வாண்டிகிராஃப் இயற்றி

வாண்டிகிராஃப் இயற்றியில், பெரியதோர் உள்ளீடு அற்ற உலோகக் கோளம் காப்பிடப்பட்ட தூண் ஒன்றின்மேல் வைக்கப் பட்டுள்ளது. பட்டுப் பட்டை ஒன்று P, P_1 என்ற கப்பிகளால் நகர்த்தப் படுகிறது. இந்தப் பட்டை கோளத்தினுள் நுழையவும் வெளியேறவும் வசதியாகக் கோளகப் பரப்பில் ஒரு இடைவெளி உள்ளது. C_1 என்ற உலோகச்சீப்பு பட்டைக்கு அருகில் உள்ளது. G என்பது ஒரு சிறிய உலோகக் குண்டு. 10 KV நேர் மின்னழுத்தக் கருவி *(D.C. Generator)* ஒன்றுடன் C_1 இணைக்கப்பட்டு நேர்மின்னூட்டம் பெறுகிறது. நேர்மின்னூட்டமானது C_1-ன் முனைகளால் பட்டையின் மேல் தெளிக்கப்படுகின்றது. இவ்வாறு தெளிக்கப்பட்ட மின் னூட்டமானது பட்டையின் உதவியால் S_1 கோளத்தினுள் எடுத்துச் செல்லப்படுகின்றது. அங்கு C_2 என்ற மற்றொரு உலோகமுனை மூலம் அம் மின்னூட்டம் S_1 க்குக் கடத்தப்படுகின்றது. எனவே S_1 நேர்மின்னூட்டம் பெறும். கோளத்தினுள் C_2 மூலமாக மின் னூட்டத்தை இழந்த பட்டை, மீண்டும் C_1 -லிருந்து மின்னூட்டம்

பெற்று S_1க்கு அளிக்கும். இவ்வாறாக, பட்டை சுழலத் தொடங்கிய சிறிது நேரத்தில் S_1 -ன் மின்னூட்டம் அதிகரிக்கும். இவ்வாறே S_2 என்ற மற்றொரு கோளத்தையும் எதிர் மின்னூட்டம் பெறச் செய்யலாம். இதனால் S_2 விற்கும் S_1 -க்கும் இடையில் மின்பொறி உருவாகும் நிலையும் தோன்றலாம்.

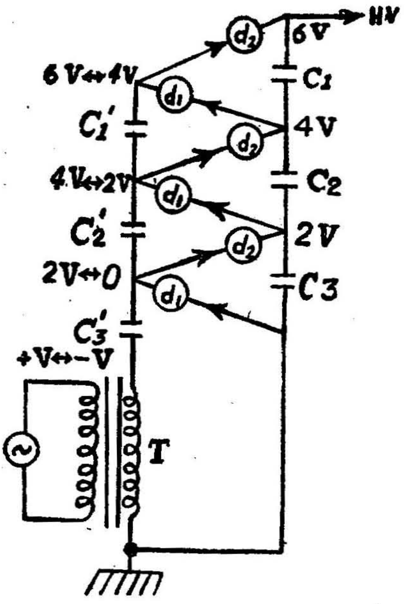
காட்டாக, மசாச்சூஸெட்ஸ் தொழில் நுட்பக் கழகத்தில் (*Masschusetts Institute of Technology*) அணுக்கரு மாற்றத்திற்குப் பயன்படுத்தப்பட்ட வாண்டிகிராஃப் இயற்றியில் உள்ள நேர்மின்னூட்ட எதிர்மின்னூட்டக் கோளகங்களுக்கிடையே 9·15 மீ. முதல் 12·19 மீ. வரை நீளமுள்ள மின்பொறிகள் தோன்றின. இக் கருவியிலிருந்து $5{\cdot}1 \times 10^6$ வோல்ட்கள் மின்னழுத்தம் பெறப்பட்டது. நிலை மின்னியல் துகள் முடுக்கிகளிலேயே தனக்கெனச் சிறப்பானதொரு இடத்தை வாண்டிகிராஃப் இயற்றி பெற்றுள்ளது. இப் பொறியானது 4 *MeV* -லிருந்து 6 *MeV* வரை ஆற்றல் கொண்ட கதிர்வீச்சுகளற்ற துகள் கற்றைகளை உருவாக்க வல்லது. இப் பொறி தரும் கற்றையின் ஆற்றல் ஒருபடித்தானதாக (*Homogeneous*) இருக்கும். இப் பொறியிலிருந்து வெளிவரும் துகள் கற்றையைச் சிறு குறுக்கு வெட்டுப் பரப்பிலும் குவிய வைக்கலாம். தவிரவும், தேவைக்கேற்ப மின்னழுத்தத்தை வேறுபடுத்துவது எளிதாகையால், இலக்கின்மேல் மோதுகின்ற கற்றையின் ஆற்றலையும் வேறுபடுத்துதல் இயலும். இதன் பயனாய், அணுக்கரு மாற்றங்களை ஆராய இந்தப் பொறி பெரிதும் பயன்படுகின்றது.

3.5. காக்ராஃப்ட் வால்டன் பொறி (Cockroft Walton Machine)

அணுக்கரு மாற்றங்களை (*Nuclear Transmutation*) உருவாக்கப் பயன்படுத்தப்பட்ட முதல் பொறி காக்ராஃப்ட் வால்டன் இயற்றியாகும் (*Cockroft Walton Generator*). துகள்களை நிலைமின்னழுத்தம் மூலம் முடுக்கும் தத்துவத்திற்கு இப் பொறியும் வழிவகுத்தது.

இப் பொறியில் இரு மின்னேற்பித் தொடர்கள் உள்ளன. இரு தொடர்களும் படத்திலுள்ளவாறு பல டையோடுகளால் (*Diodes*) இணைக்கப்பட்டுள்ளன. (படம் - 3.5). டையோடுகள் அம்புக் குறியிட்ட திசையில்தான் மின்னோட்டம் பாய்ச்ச வல்லன. மாறு மின்னோட்டம் தோற்றுவிக்கும் மின்மாற்றி (*T*)ஒன்றினால் இயற்றியானது மின்னூட்டம் பெறுகின்றது. இந்த மின்மாற்றி *V* உச்சமதிப்புடைய *V(t)* மின்னழுத்தத்தைத் தோற்றுவிக்க வல்லது. ஒவ்வொரு வரிசை

யிலும் உள்ள மின்ஏற்பிகளின் எண்ணிக்கை n என்று கொள்ளலாம். இம் மின்ஏற்பிகள் $C_1, C_2, \ldots C_n$ எனவும் $C'_1, C'_2, \ldots C_n'$ எனவும் குறியிடப்பட்டுள்ளன. வலப்பக்கத்தில் உள்ள ஒவ்வொரு மின்னேற்பியின் மின் ஏற்புத் திறன் (*Capacity*) C_r எனவும், இடப்பக்கத்தில் உள்ள மின்ஏற்பி ஒவ்வொன்றின் மின் ஏற்புத் திறன் C'_r எனவும் குறிப்போம். C_r ஐ மின்னூட்டம் பெறச் செய்யும் மின்னழுத்தத்தை $u_r(t)$ எனக் கொள்வோம். வலப்பக்க வரிசையிலிருந்து இடப்பக்க வரிசைக்கு மின்சாரம் கடத்தும் டையோடுகளை 'd_1', எனவும், இடப்பக்க வரிசையிலிருந்து வலப்பக்க வரிசைக்கு மின்சாரம் கடத்தும் டையோடுகளை 'd_2' எனவும் குறிப்போம்.

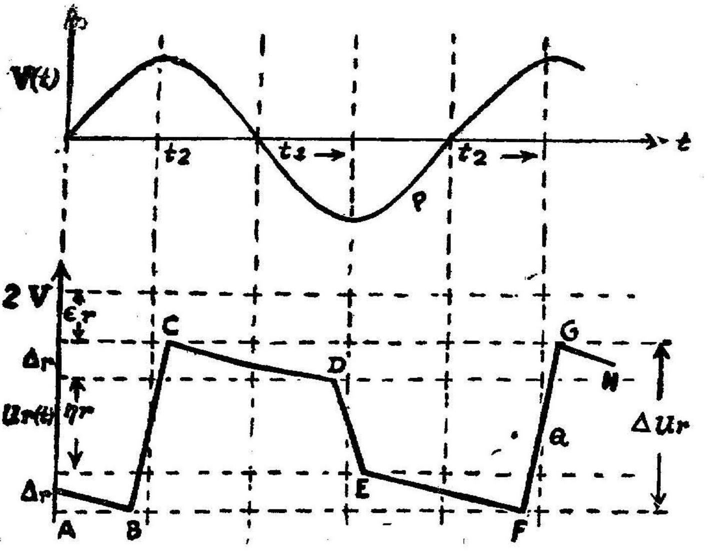


படம்3.5 காக்ராஃப்ட் வால்டன் பொறியின் சுற்று

உயர் மின்னழுத்த முனை வழியே (*HV Terminal*) பொறியிலிருந்து மின்சாரம் பெறாத நிலையில் எல்லா மின்ஏற்பிகளும் $2V$ மின்னழுத்தத்தால் மின்னூட்டம் பெறும். இந்த நிலையில் $u_r(t)$ எவ்விதம் அமையும் என்று காண்போம். வலப்பக்கத்தில் உள்ள மின்ஏற்பிகளின் மின்னழுத்தம் நிலையானதாகும். இடப்பக்கத்தில் அமைந்த மின் ஏற்பிகளின் மின்னழுத்தமானது C'_3-ல் 0 க்கும் $2V$க்கும் இடையேயும், C_2' -ல் $2V$க்கும் $4V$க்கும் இடையேயும், C'_1- ல் $4V$க்கும் $6V$க்கும் இடையேயும் அலைவுறும்.

அவ்விதமன்றி, பொறியிலிருந்து மின்சாரம் பெறப்படுமாயின் இவ்வமைப்பு குலையும். அதாவது, மின்ஏற்பிகளின் மின்னழுத்தங்கள் படம் - 3.6 ல் (வளைகோடு Q) காட்டியுள்ளவாறு பெருமமதிப்பில் சற்றே குறைவதோடு ஏற்ற இறக்கத்திற்கும் உள்ளாகும். இயற்றியை மீண்டும் நிலைமாறுச் சூழ்நிலைக்குக் கொண்டுவர டையோடுகள் மின்சாரம் கடத்தத் தொடங்கும். சுருங்கச் சொன்னால், பொறியிலிருந்து மின்சாரம் பயன்படுத்தப்படுமானால், இயற்றியின் நிலைமாறுச் சூழ்நிலை குலையுமென்றும், இதைத் தவிர்க்க டையோடுகள் மின்சாரம் கடத்துமென்றும் கூறலாம்.

இனி, மின்மாற்றியில் ஏற்படும் மின்னழுத்த வேறுபாடும், C_r - ல் ஏற்படும் ஏற்ற இறக்கங்களும் எவ்விதம் அமைகின்றன என்று காண்போம். மின்மாற்றியில் தோற்றுவிக்கப்படும் மின்னழுத்தமானது t_2 காலத்தில் பெருமமதிப்பையும் t_1 காலத்தில் சிறுமமதிப்பையும் அடைவதைப் படம் 3.6 (வளைகோடு P) காணலாம். இவ்விதம் மின்மாற்றியினால் தோற்றுவிக்கப்படும் மின்னழுத்தம் $V(t)$-ன் மாறுதல்களுக்கேற்ப, மின் ஏற்பிகளின் மின்னழுத்தம் $u_r(t)$ எவ்வாறு மாறுகிறது எனக் காண்போம். $V(t)$ பெருமத்தை அடையும் தருணத்தில் மின் ஏற்பிகள் C'_r-ன் மேல்தகடுகளின் *(Upper Plates)*



படம் 3.6 மின்மாற்றியின் மின்னழுத்த அமைப்பும் - C_rன் மின்னழுத்தமும்

மின்னழுத்தம், C_r - ன் மேல்தகடுகளின் மின்னழுத்தத்தைவிட அதிகமாக இருக்கும். எனவே, மிகக் குறுகிய காலத்தில் d_2 டையோடுகள் குறிப்பிட்டதொரு அளவு மின்சாரத்தைப் பாய்ச்சும். அதன் பயனாய் u_r ஆனது வளைகோடு Q -ல் உள்ளவாறு உயரும் (C). அடுத்த அரை அலைவு நேரத்தில் *(Half period)* வலப்பக்க மின் ஏற்பிகள் யாவும் மின்னிறக்கம் பெறும். இதனால் $u_r(t)$ வளைகோடு Q -ல் காட்டியுள்ளவாறு குறையும் (D). அடுத்து $V(t)$ சிறும மதிப்பை அடையும் தருணத்தில் C_r-ன் மேல்தகட்டின் மின்னழுத்தம் C'_{r-1} - ன் மேல்தகட்டின் மின்னழுத்தத்தைவிட அதிகமாக இருக்கும். எனவே, டையோடு d_1 குறிப்பிட்டதொரு அளவுள்ள மின்சாரத்தை

இடப்பக்க வரிசைக்குப் பாய்ச்சும். இதனால் $u_r(t)$ மிகவும் ஒழுங்கற்றுக் குறையும் (E). அடுத்த அரைஅலைவு நேரத்தில் வலப்பக்க வரிசையானது முடுக்கும் பொறிக்குத் தொடர்ந்து மின்சாரத்தைத் தரும். இதனால் $u_r(t)$ மிகவும் குறைந்து கொண்டே வந்து, தன் தொடக்கப் பெரும மதிப்பை மீண்டும் அடுத்த t_2 வின் போதுதான் அடையும் (G). ஆகவே, $u_r(t)$ நிலையானதாக அமையாமல் Δu_r வீச்சுடன் *(Amplitude)* ஏற்ற இறக்கங்களுக்கு உள்ளாகின்றது எனக் கூறலாம்.

மின் ஏற்பிகள் பெறும் பெரும மின்னழுத்தமானது $2V$ ஆக முடியாது என்று கூறப்பட்டது. $2V$-க்கும் $u_r(t)$-ன் பெரும மதிப்பிற்கும் உள்ள வேறுபாட்டை ε_r என்று குறிப்போம். (படம் -3.6). மேலும் அரை அலைவு நேரத்தில் *(Half Period)* $u_r(t)$-ன் மதிப்பில் ஏற்படும் குறைவை Δr என்று குறிப்போம் (படம் - 3.6). t_1 கணத்தில் மின்னழுத்தம் பெறும் வீழ்ச்சியை η_r எனக் குறிப்போம் (படம் - 3.6).

$$\Delta u_r = \eta_r + 2\,\Delta r \qquad (3.8)$$

ஆகும்.

நிலைமாறு சூழ்நிலையில் *(Steady State)* τ காலத்தில் மின் ஏற்பிகளுக்குத் தரப்படும் மின்னூட்டம் q, பொறியிலிருந்து பெறப்படும் மின்னோட்டம் i எனில் $q = i\tau$. எனவே அரை அலைவு நேரத்தில் ஏற்படும் மின்னழுத்த மாற்றம்

$$\Delta r = \frac{q}{2C_r}$$

ஆகும்.

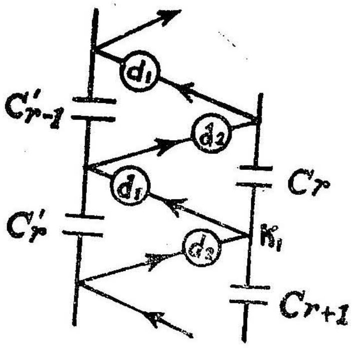
$$\therefore\ \Delta r = \frac{i\tau}{2C_r} \qquad (3.9)$$

C_{r+1}-ன் மேல் தகட்டிற்கும் C_r-ன் கீழ் தகட்டிற்கும் பொதுவான ஒரு புள்ளியைக் கருதுவோம் (படம் 3.7 ல் K_1). இந்தப் புள்ளியில் மின்னூட்டமானது $(C_{r+1}\,u_{r+1} - C_r\,u_r)$ ஆகும். t_1 கணத்தில் இந்த மின்னூட்டம் பெறும்

$$\text{மாற்றம்} = (C_{r+1}\,\eta_{r+1} - c_r\,\eta_r) \qquad (3.10)$$

ஆகும். சமன்பாடு - 3.10 ல் குறிப்பிட்டவாறு அமையும் மின்னூட்டமானது t_1 கணத்தில் K_1- ஐ விட்டு d_1 வழியாக இடப்பக்க வரிசைக்குச் செல்லும். இந்த மின்னூட்டமே q ஆகும்.

படம் - 3.5 லிருந்து மின் ஏற்பி C_1 ஆனது இடப்பக்க வரிசையில் உள்ள மின் ஏற்பி எதையும் மின்னூட்டம் பெறச் செய்யவில்லை என்று அறியலாம். ஆகவே $\eta_1 = 0$ ஆகும். வலப்பக்க வரிசையிலுள்ள மின்னேற்பிகள் x எனில்,



படம் 3.7 காக்ராஃப்ட் வால்டன் இயற்றியின் சுற்று

$$C_2 \eta_2 - C_1 \eta_1 = q$$
$$C_3 \eta_3 - C_2 \eta_2 = q$$
$$C_4 \eta_4 - C_3 \eta_3 = q$$

....

....

....

....

....

$$C_x \eta_x - C_{x-1} \eta_{x-1} = q$$

$$C_x \eta_x = (x-1)\, q \qquad (3.12)$$

$$\therefore \quad \eta_x = \frac{(x-1)\, q}{C_x} \qquad (3.13)$$

சமன்கள் (3.9), (3.13) - ஐ சமன் (3.8) - ல் பதிலீடு செய்தால்,

$$\triangle u_x = \frac{(x-1)\, q}{C_x} + \frac{2q}{2C_x}$$

$$\therefore \triangle u_x = \frac{xq}{C_x} \qquad (3.14)$$

சமன் (3.14) லிருந்து *HV* முனை மின்னழுத்த ஏற்ற இறக்கம் $\triangle u$ - ஐப் பின்வருமாறு குறிக்கலாம்.

$$\triangle u = \sum_{1}^{n} {}_x \; \triangle u_x \qquad (3.15)$$

அதாவது,

$$\triangle u = q \sum_{1}^{n} {}_x \; \frac{x}{C_x} \qquad (3.16)$$

மின் ஏற்பிகள் யாவும் ஒரே மின்ஏற்புத் திறன் உடையனவாக இருக்குமானல் ($C_x = C$)

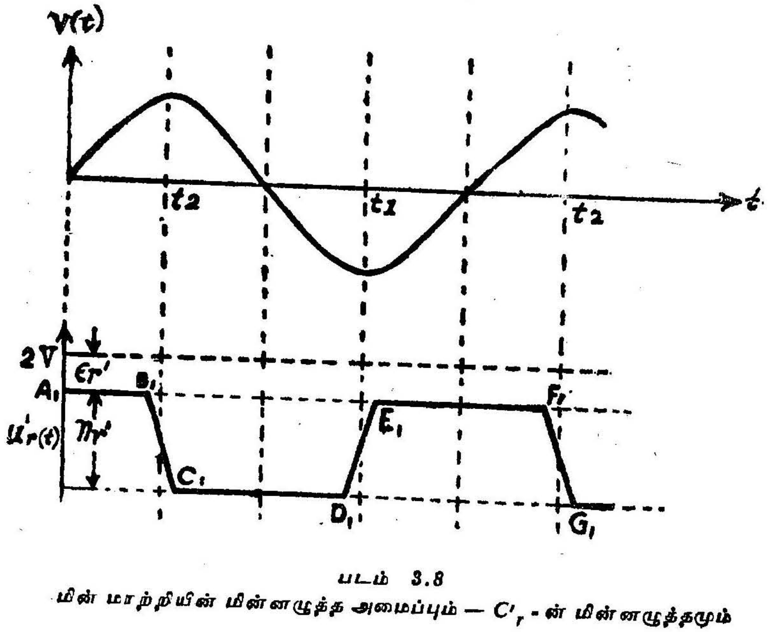
$$\Delta u = \frac{n(n+1)}{2} \frac{q}{C}$$

$$= \frac{n(n+1)}{2} \frac{i\tau}{C}$$

$\frac{1}{\tau}$ ' அதிர்வெண் எனில்,

$$\Delta u = \frac{n(n+1)}{2} \frac{i}{C\nu} \quad (3.17)$$

சமன் (3.17) - லிருந்து, மின்னழுத்த ஏற்ற இறக்கம் n^2 - ஐச் சார்ந்துள்ளது என்பது புலனுகும். தவிர Δu வானது பொதுவாக மின்மாற்றிக்கு அருகிலுள்ள மின் ஏற்பிகளின் மின்ஏற்புத் திறனைச் சார்ந்துள்ளது என்பதும் புலனுகும். எனவே, மின்மாற்றிக்கு அருகில் அதிகமான மின் ஏற்புத் திறனுடைய மின் ஏற்பிகளை இணைப்போமானல் Δu வானது மிகவும் குறைந்து விடும். ஆகவே குறைந்த மின் ஏற்புத் திறனுடைய மின்ஏற்பிகள் மேல்பகுதியிலும், அதிக மின் ஏற்புத் திறனுடைய மின் ஏற்பிகள் கீழ்பகுதியிலும் அமையுமாறு செய்தல் மரபு.



படம் 3.8
மின் மாற்றியின் மின்னழுத்த அமைப்பும் — C'_r - ன் மின்னழுத்தமும்

பொறியிலிருந்து HV முனை வழியாக மின்சாரம் ஏற்கப்படும்பொழுது மின்னழுத்தத்தின் ஏற்ற இறக்கம் Δu - ன் இயல்பை ஆராய்ந்தோம். இனி மின்னழுத்தக் குறைபாடு (*Reduction*)$_r$ ε_r-ஐப் பற்றிக் காண்போம். படம்-3.8 -ல் மின்ஏற்பி C'_r ல் உள்ள $u'_r(t)$-ன் மதிப்பைக் காணலாம். படம் 3.8 ஐப் படம் 3.6 உடன் ஒப்பிட்டு ஆராய்வோம்.

t_2 கணத்தில் C_r மின் ஏற்பிகள் மின்னிறக்கம் பெறும்போது, C'_r மின் ஏற்பிகள் மின்னூட்டம் பெறுகின்றன. தவிர, t_1 கணத்தில் C_r மின்ஏற்பிகள் மின்னூட்டம் பெறும்போது C'_r மின்ஏற்பிகள் மின்னிறக்கம் பெறுகின்றன. மின் ஏற்பிகளிலிருந்து மின்சாரம் பயன்படுத்தப்படாத ஓர் அரை அலைவு நேரத்தில் மின்னழுத்தம் மாறிலியாக உள்ளது (C_1 D_1) என்பதைப் படம் 3.8-ல் காணலாம். மின் ஏற்பிகள் C_r - ம் C'_{r-1} - ம் பக்கஇணைப்பு முறையில் இணைக்கப் பட்டுள்ளன. எனவே t_1 கணத்தில் மின்னோட்டம் தாங்கி செல்லும் d_1 டையோடுகள் மின்சாரம் கடத்துவதை நிறுத்தியவுடன் C_r, C'_{r-1} இவற்றின் தகடுகளின் மின்னழுத்தங்கள் சமமாகும்.

ஆகவே, படம் - 3.6, படம் - 3.8 லிருந்து முறையே E, E_1 என்ற புள்ளிகளின் y - ஆயத் தொலைவுகள் (*Ordinates*) சமம் என்று கூறலாம்.

$$\therefore \quad 2V - \varepsilon_r - \Delta r - \eta_r = 2V - \varepsilon'_{r-1} \qquad (3.18)$$

இதைப் போலவே படம் - 3.6 ல் உள்ள C என்ற புள்ளியின் y ஆயத்தொலைவும், படம் - 3.8 ல் உள்ள C_1 என்ற புள்ளியின் y ஆயத்தொலைவும் சமமாகும்.

$$\therefore \quad 2V - \varepsilon_r = 2V - \varepsilon'_r - \eta'_r \qquad (3.19)$$

மேலும், $$\eta'_1 = \frac{q}{C'_1}$$

ஆதலால், $$\eta'_x = \frac{xq}{C'_x} \qquad (3.20)$$

என எழுதலாம். எனவே,

$$2V - \varepsilon_r = 2V - \varepsilon'_r - \eta'_r$$

$$2V - \varepsilon_{r-1} = 2V - \varepsilon'_{r-1} - \eta'_{r-1}$$

$$\therefore \quad \varepsilon_{r-1} = \varepsilon'_{r-1} + \eta'_{r-1} \qquad (3.21)$$

சமன்பாடு 3.18 - லிருந்து

$$-\varepsilon_r - \triangle r - \eta_r = - \varepsilon'_{r-1}$$

அல்லது $$\varepsilon_r = \varepsilon'_{r-1} - \eta_r - \triangle r$$

$\triangle r = \frac{q}{2C_r}$ ஆதலால் $$\varepsilon_r = \varepsilon'_{r-1} - \eta_r - \frac{q}{2C_r} \quad (3.22)$$

எனவே, சமன் 3.22 லிருந்து சமன் 3 21 - ஐக் கழிக்க,

$$\varepsilon_r - \varepsilon_{r-1} = - \eta_r - \eta'_{r-1} - \frac{q}{2C_r}$$

$$\therefore \quad \varepsilon_r - \varepsilon_{r-1} = - \frac{(r\text{-}1)\, q}{C_r} - \frac{(r\text{-}1)\, q}{C'_{r-1}} - \frac{q}{2C_r}$$

எனவே $$\varepsilon_r - \varepsilon_{r-1} = q \left\{ \frac{1}{2C_r} - \frac{r}{C_r} - \frac{(r\text{-}1)}{C'_{r-1}} \right\} \quad (3.23)$$

எனவே, சமன்பாடு 3.23 ல் rக்கு 2க்கு மேற்பட்ட மதிப்புகளைக் கொடுப்போமானால்,

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = q \left\{ \frac{1}{2C_2} - \frac{2}{C_2} - \frac{1}{C'_1} \right\}$$

$$\varepsilon_3 - \varepsilon_2 = q \left\{ \frac{1}{2C_3} - \frac{3}{C_3} - \frac{2}{C'_2} \right\}$$

$$\varepsilon_4 - \varepsilon_3 = q \left\{ \frac{1}{2C_4} - \frac{4}{C_4} - \frac{3}{C'_3} \right\}$$

....

....

$$\varepsilon_y - \varepsilon_{y-1} = q \left\{ \frac{1}{2C_y} - \frac{y}{C_y} - \frac{(y\text{-}1)}{C'_{y-1}} \right\}$$

$$\varepsilon_y - \varepsilon_1 = q \Bigg[\left\{ \frac{1}{2C_2} + \frac{1}{2C_3} + \frac{1}{2C_4} + \cdots\cdots + \frac{1}{2C_y} \right\} - \left\{ \frac{2}{C_2} + \frac{3}{C_3} + \frac{4}{C_4} + \cdots\cdots + \frac{y}{C_y} \right\} - \left\{ \frac{1}{C'_1} + \frac{2}{C'_2} + \frac{3}{C'_3} + \cdots\cdots + \frac{(y\text{-}1)}{C'_{y-1}} \right\} \Bigg]$$

$$\therefore \varepsilon_y - \varepsilon_1 = q\sum_{2}^{y} r\left(\frac{1}{2C_r} - \frac{r}{C_r} - \frac{r-1}{C'_{r-1}}\right) \quad (3.24)$$

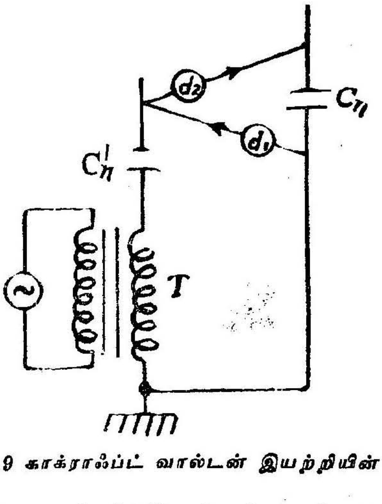
இனி, $y = n$ எனில்,

$$\varepsilon_n - \varepsilon_1 = q\sum_{2}^{n} r\left(\frac{1}{2C_r} - \frac{r}{C_r} - \frac{r-1}{C'_{r-1}}\right) \quad (3.25)$$

சமன் 3.24 -ஐ 3.25 லிருந்து கழிப்போமானல்,

$$\varepsilon_n - \varepsilon_y = q\sum_{y+1}^{n} r\left(\frac{1}{2C_r} - \frac{r}{C_r} - \frac{(r-1)}{C_r'-1}\right) \quad (3.26)$$

இனி, வலப்பக்க வரிசையின் கடைசி மின்ஏற்பியில் ஏற்படும் மின்னழுத்தக் குறைவைக் கணக்கிடுவோம்.



படம் 3.9 காக்ராஃப்ட் வால்டன் இயற்றியின் சுற்று

படம் 3.9லிருந்து d_2 மின்னோட்டம் கடத்தாத கணத்தில் C -ன் மின்னழுத்தம் $=$ C'_n -ன் மின்னழுத்தம் + மின்மாற்றி அளிக்கும் மின்னழுத்தம்

அதாவது $u_n = u'_n + V$

$$\therefore 2V - \varepsilon_n = V - \eta'_n + V \quad (3.27)$$

மின் ஏற்பி C'_n ஆனது டையோடு d_1 மூலம் மின்மாற்றியிலிருந்து நேரடியாக மின்னூட்டம் பெறுகின்றது. எனவே, மின்னழுத்தம் குறையாது. அதாவது $\varepsilon'_n = 0$ ஆகும்.

சமன் 3.27 லிருந்து $\varepsilon_n = \eta'_n$

சமன் 3.20 லிருந்து $$\varepsilon_n = \frac{nq}{C'_n} \tag{3.28}$$

ஆகும்.

ε_n -ன் இந்த மதிப்பை சமன் 3.26-ல் பதிலீடு செய்தால்,

$$\varepsilon_n - \varepsilon_y = \frac{rq}{C'} - \varepsilon_y = q \sum_{y+1}^{n}{}_r \left(\frac{1}{2C_r} - \frac{r}{C_r} - \frac{r-1}{C'_{r-1}} \right)$$

$$\therefore \varepsilon_y = q \left\{ \sum_{y+1}^{n}{}_r \frac{(r-\frac{1}{2})}{C_r} + \sum_{y}^{n}{}_r \frac{r}{C'_r} \right\} \tag{3.29}$$

எனவே, பொறியின் மொத்த மின்னேற்பிகளைக் (n) கருத்திற் கொள்வோமாயின், HV முனையில் மின்னழுத்தக் குறைவு,

$$\Delta V_0 = \sum_{1}^{n}{}_y \varepsilon_y$$

ஆகும்.

$$\therefore \Delta V_0 = q \sum_{1}^{n}{}_y \left\{ \sum_{y+1}^{n}{}_r \frac{(r-\frac{1}{2})}{C_r} + \sum_{y}^{n}{}_r \frac{r}{C'_r} \right\} \tag{3.30}$$

எல்லா மின்ஏற்பிகளும் ஒரே அளவு மின்ஏற்புத் திறன் உடையன எனில், $(C_r = C'_r = C)$,

$$\Delta V_0 = \frac{q}{C}\left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{4} n^2 + \frac{1}{12} n\right) \tag{3.31}$$

ஆகும்.

மேலும் $q = \dfrac{i}{\nu}$ ஆதலால்,

$$\Delta V_0 = \frac{i}{\nu C}\left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{4} n^2 + \frac{1}{12} n\right) \tag{3.32}$$

சமன் 3.32 லிருந்து n -ன் மதிப்பை, அதாவது மின்னேற்பிகளின் மொத்த எண்ணிக்கையைக் குறைப்பதாலும், ν மதிப்பை அதிகரிப் பதாலும், $\triangle V_0$ மதிப்பை, அதாவது HV முனையில் மின்னழுத்த மதிப்பில் ஏற்படும் குறைவைக் குறைக்கலாம். இவ்வாறாகக் காக்ராஃப்ட் பொறியின் இயக்குதிறனை அதிகமாக்கலாம்.

முதன்முதலில் துகளை முடுக்கப் பயன்படுத்தப்பட்ட பொறிகளில் உயர்மின்னழுத்தம் தரும் காக்ராஃப்ட் வால்டன் இயற்றிதான் பயன்படுத்தப் பட்டது. உரிய மதிப்புள்ள மின் மாற்றியையும் மின் ஏற்பிகளையும் பயன்படுத்தி 600,000 வோல்ட்கள் வரை இப் பொறியிலிருந்து பெறப்பட்டது.

3.6. முடிவுரை

மின்புலத்திலும் காந்தப்புலத்திலும் மின்னூட்டத் துகள்களின் இயல்பறிய, தாம்சன் கண்ட ஆய்வையும், எக்ஸ் கதிர் விளைவையும் கண்டோம். இரு முறைகளிலும் மின்புலத்தால் துகள்கள் முடுக்கம் பெறும் என்பது விளக்கப்பெற்றது. தவிர, தாம்சன் முறையில் காந்தப்புலத்தால் துகளின் பாதை விலக்கப்படும் என்பதும் அறிய வந்தது.

பின்னர், உயர் மின்னழுத்தங்களை உருவாக்க வாண்டி கிராஃப் இயற்றியும், காக்ராஃப்ட் வால்டன் பொறியும் உருவாக்கப்பட்டன என்றும் கண்டோம். இனி வரும் அத்தியாயங்களில், நேரியல் பொறி தொடங்கி, வன்குவிப்புச் சிங்க்ரோட்ரான் வரையிலான முடுக்கும் பொறிகளின் வளர்ச்சி கூறப்படும்.

4. நேரியல் பொறிகள்

4.1. முன்னுரை

மின்புலம் மட்டுமே செயல்படும் இப் பொறியில் ஒத்திசைவு முடுக்கத் தத்துவத்தைப் பயன்படுத்தி, முதன் முதலில் அமைக்கப்பட்ட விதரோவின் நேரியல் பொறியையும் (*Wideröes Linear Acceleratar*), பின்னர் அல்வாரெஸினல் (*Alvarez*) மாற்றியமைக்கப் பட்ட நேரியல் பொறியின் அமைப்பையும் கருதுவோம்.

நேரியல் பொறிகளில் அமைந்த கூறுகளின் நீளத்திற்கு ஏற்ப ஆற்றல் மாறுபடும் என்பதுநிறுவப்படும். மேலும், துகள்கள் குவிக்கும் விசையின் உதவியினுல் சிதருமல் காக்கப்படும் என்பதையும், கொத்தாக்கிகளேயும் கொத்தகற்றிகளேயும் கொண்டு உயர் ஆற்றல் பெற்ற துகள்களேச் செவ்வியமுறையில் செயல்படுத்தலாம் என்பதையும் காணலாம்.

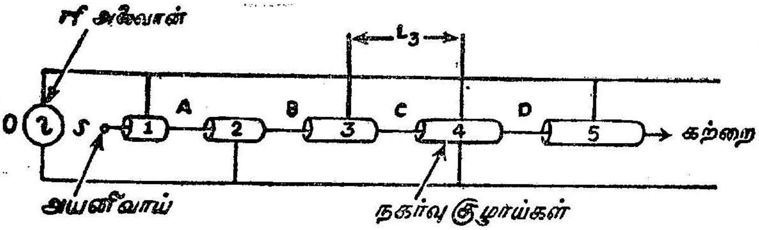
பின்னர், முடுக்கப்பட வேண்டிய துகளின் பண்பிற்கேற்ப உருவாக் கப்படும் அயனிவாய்களேப் பற்றியும் கூறப்படும். புரோட்டான், எலெக்ட்ரான் ஆகிய துகள்கள் நிறை காரணமாகப் பெரிதும் மாறுபடுவன ஆதலால், நேரியல் முடுக்கியின் அமைப்பில் அவற்றிற் கேற்றவாறு உரிய வேறுபாடுகள் அமைக்கப்பெற வேண்டும் என்ப தையும் காணலாம். லொரெண்ட்ஸ் சுருக்கம் (*Lorentz Contraction*) காரணமாக எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியில் குவிக்கும் விசைகள் அமையும் பாங்கும் கூறப்படும்.

4.2. அமைப்பும் இயக்கமும்

நேரியல் முடுக்கியில் ஒத்திசைவுமுடுக்கத் (*Resonant Acceleration*) தத்துவம் பயன்படுகின்றது. மாறு மின்புலமானது, (*Alternating Electric Field*) காலத்தையொட்டித் தன் திசையை மாற்றிக் கொள்ள வல்லது என்பதை அறிவோம். எனவே, மின்னூட்டமுடைய

துகள் ஒன்றை மாறுமின்புலத்தில் இயங்க வைப்போமானால், மின்புலத்தின் திசைக்கேற்பத் துகள் முடுக்கம் பெறலாம்; அல்லது எதிர்முடுக்கம் பெறலாம். எனவே, இத்தகு மின்புலம் செயல்படும் இந்தப் பொறியில், புலம் முடுக்கந்தர வல்லதாக உள்ளபோது மட்டும் துகள் அதைச் சந்திக்குமாறும், எதிர்முடுக்கந்தர வல்லதாக உள்ளபோது அதைச் சந்திக்காமலும் செய்ய வேண்டும். ஆகவே, புலமானது துகளை எதிர்முடுக்கம் அடையச் செய்வதாக அமையும் கால அளவில், துகளைப் புலத்தின் ஆதிக்கத்திலிருந்து காக்கின்ற அமைப்பொன்றைப் பொறி பெற்றிருக்க வேண்டும் என்பது தெளிவாகும். அதாவது, துகள் தன் ஆற்றலைப் பெருக்கிக் கொள்ளும் வாய்ப்புள்ள கணத்தில் மட்டுமே மின்புலத்தைச் சந்திக்க வேண்டும்.

குழாய் வடிவிலான கடத்தியொன்றைக் கருதுவோம். புறத்தே எந்த அளவிற்கு மின்னழுத்தம் இருந்தாலும், இந்தக் குழாயின் உள்ளே மின்புலம் எதுவும் செயற்படாது என்பதை அறிவோம். எனவே, மின்புலமானது எதிர்முடுக்கம் அளிக்கும் வகையில் அமையும் தருணங்களில் மட்டும் துகளை அத்தகைய குழாயினுள் இயங்குமாறு செய்வதன்மூலம், துகள் தொடர்ந்து முடுக்கம் பெறுமாறு செய்யலாம். இத்தகைய குழாய்கள், நகர்வு குழாய்கள் (*Drift Tubes*) எனப் பெயர் பெறுகின்றன. ஏனைய பொறிகளில் துகளை முடுக்குவதற்கு மின்புலமொன்றும், வழிப்படுத்தக் காந்தப்புலம் ஒன்றும் செயல்படும். ஆனால், இந்த நேரியல் முடுக்கியிலோ மின்புலம் மட்டுமே செயல்படுகின்றது.



படம் 4.1 நேரியல் முடுக்கியில் நகர்வு குழாய்களின் அமைப்பு

எளிய நேரியல் முடுக்கி ஒன்றின் அமைப்பைப் படம் 4.1 - ல் காணலாம். படத்தில் *S* என்பது முடுக்கம் பெறும் துள்களின் தோற்றுவாய். *O* என்பது உயர் மின்னழுத்த அலைவான். 1, 2,3... என்பன நகர்வு குழாய்கள். குறிப்பிட்டதொரு தருணத்தில் 1,3,5,... குழாய்கள் எதிர்மின்னூட்டம் அடைந்தால், 2, 4,... குழாய்கள்

நேர்மின்னூட்டம் பெறும். மாறாக, 1, 3, 5 ... நேர் மின்னூட்டம் அடையும்போது 2, 4... எதிர் மின்னூட்டம் பெறும்.

S என்ற அயனி வாயிலிருந்து வெளிவரும் நேர்மின்னூட்டமுடைய அயனியொன்று, குழாய் 1 எதிர் மின்னூட்டம் பெறும் கால அளவில், அதனை நோக்கி முடுக்கம் பெற்று, அதனுள் நுழையும். இவ்வாறு நுழைந்த துகளானது, குழாய் 1-ல் இயங்கும்வரை மின்புலத்தில் இருந்து காக்கப்படுகின்றது. எனவே, அக் காலஅளவில் துகள் முடுக்கம் பெறாது. குழாய் 1-லிருந்து இடைவெளி A-யை அடையும் தருணத்தில் நகர்வு குழாய்-2 எதிர் மின்னூட்டம் பெறும். எனவே துகள் A-யை அடையும் தருணத்தில் முடுக்கம் பெற்று 2-ம் குழாயினுள் நுழையும். இப்பொழுதும் மின்புலம் தன் இயல்பை மாற்றிக் கொள்ளும்வரை துகள் 2-ம் குழாயினுள்தான் இயங்கவேண்டும். அதாவது 3-ம் குழாய் எதிர்மின்னூட்டம் பெறும் தருணத்தில்தான் இடைவெளி Bயைத் துகள் அடைய வேண்டும். இவ்வாறு தொடர்ந்து அமையுமானால் துகளின் வேகமும் உயரும்; ஆற்றலும் பெருகும்.

குழாய் 1-ல் இயங்கி வெளிவரும்போது இருந்த வேகத்தைவிட, A-ல் முடுக்கம் பெற்று, குழாய் 2-ல் இயங்கும்போது துகளின் வேகம் அதிகமாக இருக்கும் என்பது தெளிவு. குழாய் 1-ம் குழாய் 2-ம் ஒரே நீளமுடையதாக இருக்குமானால், இரண்டாவது குழாயினுள் நுழைந்த வேகம் மிகுந்த துகள் மின்புலமானது முடுக்கும் இயல்பைப் பெறும், முன்பே, இடைவெளி B-யை அடையும் என்பது தெளிவு. எனவே, வேகம் மிகுந்த துகள் உரிய தருணத்தில் B-யை அடைய வேண்டுமெனில், இரண்டாவது குழாயின் நீளம் முதல்குழாயின் நீளத்தை விட அதிகமாக இருக்கவேண்டும். இதைப்போலவே, மூன்றாவது குழாயின் நீளம் இரண்டாவது குழாயின் நீளத்தைவிட அதிகமாக இருக்கவேண்டும். பொதுவாகக் கூறுமிடத்து, துகளானது முடுக்கம் பெறத்தக்க தருணங்களில் இடைவெளிகளை நாடவேண்டுமெனில், நகர்வு குழாய்களின் நீளமும் படிப்படியாக உயரவேண்டும் என்பது தெளிவாகும். அதாவது,

முதற்குழாயின் நீளம் < இரண்டாவது குழாயின் நீளம் < மூன்றாவது குழாயின் நீளம்...

நேரியல் முடுக்கிகளில் துகள் பெறும் இறுதி ஆற்றல், அது முடுக்கம் பெறும் இடைவெளியின் எண்ணிக்கையைச் சார்ந்துள்ளது எனக் கூறலாம். இந்தத் தத்துவத்தைப் பயன்படுத்தி, புரோட்டான் போன்ற நிறைமிகுந்த துகள்களை முடுக்க இயற்பியலாளர்கள் முனைந்தனர். ஒருசில வகைகளில் வட்டப் பொறிகளையும் (*Circular Accelerators*) விடச் சிறந்து விளங்கும் இந்த நேரியல் பொறிகளின் பல வகைகளைப்பற்றி இனிக் காண்போம்.

4.3. விதரோவின் நேரியல் முடுக்கி (Wideröe's Linear Accelerator)

முதல் நேரியல் முடுக்கி 1928-ஆம் ஆண்டில் விதரோ என்பவரால் உருவாக்கப்பட்டது. இது மூன்று நகர்வு குழாய்கள் கொண்டது. இந்த எளிய நேரியல் முடுக்கியில் விதரோ Na^+, K^+ போன்ற அயனிகளை 50 KeV ஆற்றலுக்கு முடுக்கினர். பின்னர் 1931-ல் லாரென்ஸ் (*Lawrence*), சோலன் (*Solan*) ஆகிய இருவரும் 30 நகர்வு குழாய்களுடைய நேரியல் முடுக்கியை அமைத்துப் பாதரச அயனிகளை 1·26 MeV ஆற்றலுக்கு முடுக்கினர்.

நேரியல் முடுக்கியில் ஒரு குழாயும் ஓர் இடைவெளியும் சேர்ந்த அமைப்பு ஒரு கூறு எனப்படும். அதன் நீளத்தை L எனக் குறிக்கலாம். இந்த L-ஐப் படம் 4.1-ல் உள்ளவாறு, அடுத்தடுத்துள்ள இரு நகர்வுகுழாய்களின் மையத்திற்கு இடைபட்ட தூரத்தைக் குறிப்பதாகவும் கருதுவர்.

துகள் n ஆவது கூறுன L_n-ல் இயங்கும்போது, அதன் வேகம் v_n எனக் கொள்வோமாயின் $L_n \propto v_n$ ஆகும். அலைவானின் அலைவு நேரம் τ என்றும், அலைநீளம் λ என்றும், அதிர்வெண் f என்றும் கொண்டால், ஒத்திசைவின்படி,

$$L_n = v_n \times \frac{\tau}{2} \qquad (4.1)$$

ஆகும். மேலும் $\tau = \frac{\lambda}{c}$ ஆதலால், $\beta_n = \frac{v_n}{c}$ எனில்

$$L_n = \frac{\beta_n \lambda}{2} \qquad (4.2)$$

நகர்வு குழாய்களின் நீளம் இந்தச் சமன்பாட்டிற்கேற்ப அமைக்கப்பட வேண்டும். இவ்வாறு அமைக்கப்படும் நகர்வு குழாய்களையுடைய நேரியல் முடுக்கி அரை பீட்டா லாம்டா (*Half Beta Lambda*) முடுக்கி எனப்படும். இத்தகைய முடுக்கிகள் புரோட்டான் போன்ற நேர்மின்னூட்டத் துகள்களை மட்டுமே முடுக்கப் பயன்படுகின்றன. எலெக்ட்ரான்களை முடுக்க வேறு அமைப்புடைய முடுக்கிகள் உருவாக்கப்பட்டன. அவற்றைப் பின்னர் விரிவாகக் காண்போம்.

புரோட்டான்களை முடுக்கப் பயன்படும் நேரியல் முடுக்கி, புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கி (*Proton Linear Accelerator*) என்றழைக்கப்படும். புரோட்டான்கள் ஒளியின் வேகத்தை நெருங்க வாய்ப்பில்லாக் காரணத்தால், நேரியல் பொறியில் புரோட்டான் இயக்கத்திற்குச் சார்பியல் கொள்கைப்படி அமைந்த சமன்பாடுகளைப்

(*Relativistic Equations*) பயன்படுத்த வேண்டிய தேவையில்லை. எனவே, விதரோவின் பொறியில் ஓய்வு நிலைநிறை (*Rest Mass*) M_0 கொண்ட துகள் பெறும் இயக்க ஆற்றல்

$$T_n = \frac{1}{2} M_0 v_n^2 \qquad (4.3)$$

ஆகும்.

$$\therefore v_n = \left(\frac{2T_n}{M_0}\right)^{\frac{1}{2}}$$

ஆகவே,

$$\beta_n = \frac{v_n}{c}$$

$$= \frac{1}{c}\left(\frac{2T_n}{M_o}\right)^{\frac{1}{2}}$$

எனவே. சமன் 4.2-லிருந்து

$$L_n = \frac{\lambda}{2c}\left(\frac{2T_n}{M_0}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4.4)$$

ஆகும்.

நேரியல் முடுக்கியில் துகள் ஒவ்வொரு இடைவெளியை நாடும் போதும், இரு நகர்வு குழாய்களுக்கும் இடையில் ஒரே அளவு மின்னழுத்த வேறுபாடு நிலவும். இதனால், துகளானது ஒவ்வொரு இடைவெளியிலும் அதே அளவு ஆற்றலை ஈட்டும். இந்த ஆற்றல் ஈட்டத்தை (*Energy Gain*) $\triangle T$ எனக் குறிப்போமாயின், முதல் இடைவெளியில் துகளின் ஆற்றல் ஈட்டம்,

$$T_1 = \triangle T;$$

இரண்டாம் இடைவெளியில் துகளின் ஆற்றல் ஈட்டம்

$$T_2 = T_1 + \triangle T$$

$$= 2\triangle T;$$

மூன்றும் இடைவெளியில் ஆற்றல் ஈட்டம்,

$$T_3 = T_2 + \triangle T$$

$$= 3\triangle T;$$ ஆகும். எனவே

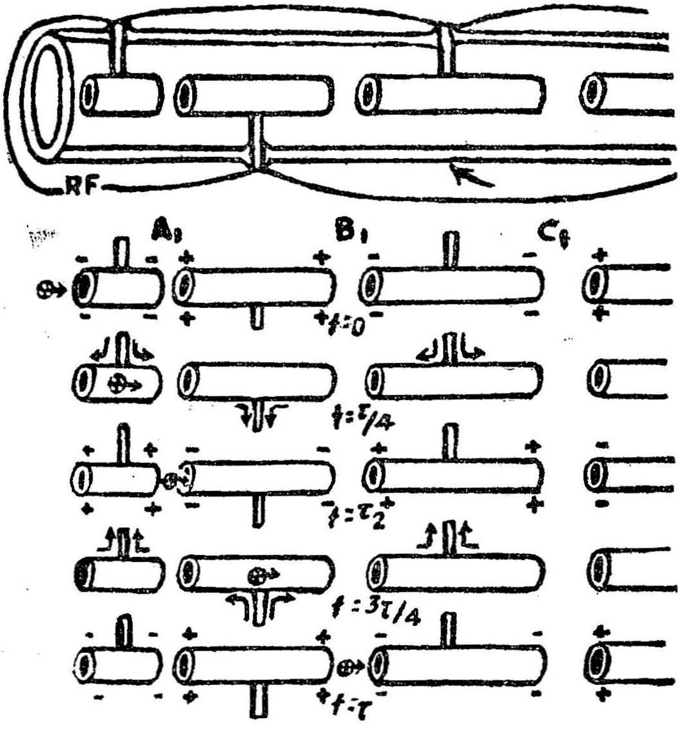
n இடைவெளிகளைக் கடந்தபின் துகளினுடைய ஆற்றல்,

$$T_n = n\triangle T \qquad (4\cdot5)$$

ஆகும். ஆகவே

$$L_n = \frac{\lambda}{2c}\left(\frac{2n\triangle T}{M_0}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4.6)$$

உரிய ஆற்றலைப் பெறுவதற்கேற்பத் துகள் இடைவெளியை நாட வேண்டுமானால், அலைவானின் அரை அலைவு நேரமும் (*Half Period,*) துகள் நகர்வு குழாயைக் கடக்க எடுத்துக் கொள்ளும் நேரமும் ஒன்றாக வேண்டும் என்பது தெளிவு.



படம் 4.2 விதரோவின் நேரியல் பொறியில் துகளின் இயக்கம்

படம் 4.2-ல் விதரோ அமைத்த நேரியல் பொறியில் துகளின் இயக்கம் காட்டப்பட்டுள்ளது. நேர் மின்னூட்டமுடைய துகள் ஒன்று முதல் குழாயின் உள்ளே நுழைந்து $\tau/2$ நேரம் கடந்தபின் இடைவெளி A_1-ஐ அடைகின்றது. இந்த $\tau/2$ கால அளவின் இறுதியில் இரண்டாவது குழாய் எதிர் மின்னூட்டம் பெறுகின்றது. எனவே துகளானது A_1-ல் முடுக்கம் பெற்று இரண்டாவது குழாயின் உள்ளே நுழைகின்றது. மேலும் $\tau/2$ நேரம் கடந்தபின் துகள் இடைவெளி B_1-ஐ நாடுகின்றது. அக் கணத்தில் மூன்றாம் குழாய் எதிர் மின்னூட்டம் பெறுகின்றது. எனவே, துகளானது மீண்டும் முடுக்கம் பெற்று மூன்றாம் குழாயினுள்ளே நுழைகின்றது. இவ்வாறாக,

பிற இடைவெளிகளிலும் துகள் ஆற்றல் பெறலாகும். துகள் குழாயினுள் இயங்கத் தேவைப்படும் நேரமும், அலைவானின் அரை அலைவுநேரமும் ஒத்திசைவு பெறுவதைப் படம் 4.2–ல் காணலாம்.

இனி, விதரோவின் நேரியல் பொறியில் துகளின் ஆற்றல் ஈட்டம் ΔTக்குரிய கோவையைப் பெறலாம். மின்புலமானது எதிர்முடுக்கப் பண்பு பெற்று, சுழியமாகி, பின் முடுக்கந்தர வல்லதாக மாறுகின்ற கணத்திலிருந்து, காலமும், மின்னழுத்தத்தின் கலைக்கோணமும், அளவிடப்படுவதாகக் கருதுவோம். நகர்வு குழாய்களுக்கு இடையில் உள்ள வெளியின் மையத்தைத் துகள் நாடும் வேளையில், காலம் t_c எனவும், கலைக்கோணம் ϕ எனவும் கொள்வோம். எனவே மின்புலத்தின் கோண அதிர்வெண் ω_{rf} எனில்,

$$\phi = \omega_{rf}\, t_c \tag{4.7}$$

ஆகும். இந்தத் துகள் இடைவெளியின் மையத்திலிருந்து $(t-t_c)$ கால அளவில் z தூரம் இயங்குமெனில்,

$$z = v\,(t-t_c) \tag{4.8}$$

ஆகும். ஆகவே $$z = v\left(t - \frac{\phi}{\omega_{rf}}\right)$$

அல்லது $$\frac{z}{v} = t - \frac{\phi}{\omega_{rf}}$$

$$\therefore\ t = \frac{z}{v} + \frac{\phi}{\omega_{rf}} \tag{4.9}$$

மின்புலம் காலத்தைச் சார்ந்திருப்பதால்,

$$\varepsilon = \varepsilon_m\, Sin\, \omega_{rf} t \tag{4.10}$$

என்று குறிக்கலாம். மின்புல வீச்சு ε_m மாறிலியென்று கருதுவோம்.

இடைவெளி மையத்திலிருந்து z தூரத்தில் உள்ள மின்புலம்

$$\varepsilon = \varepsilon_m\, Sin\left(\frac{z\omega_{rf}}{v} + \phi\right) \tag{4.11}$$

என்று குறிக்கலாம்.

விதரோவின் நேரியல் பொறியில் ஒரு கூறின் நீளம் $L = \frac{\beta\lambda}{2}$ என்று அறிவோம். $\beta = \frac{v}{c}$ ஆதலால்,

$$L = \frac{v\lambda}{c2}$$

$$= \frac{v\tau}{2} \qquad (\because \tau = \lambda/c)$$

மேலும்

$$T = \frac{2\pi}{\omega_{rf}} \text{ ஆதலால்}$$

$$L = \frac{v\pi}{\omega_r}$$

அல்லது

$$\frac{\omega_{rf}}{v} = \frac{\pi}{L} \quad (4.12)$$

எனவே,

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \, Sin\left(\frac{\pi z}{L} + \phi\right) \quad (4.13)$$

ஆகும். q மின்னூட்டமுடைய துகள் ஒன்று இடைவெளியின் மையத்திலிருந்து dz தொலைவு நகரும்பொழுது பெறும் ஆற்றல் $= q\mathcal{E}dz$. இடைவெளியின் நீளம் 'g' எனில், துகள் ஈட்டுகின்ற மொத்த ஆற்றல்

$$\Delta T = q\mathcal{E}_m \int_{-g/2}^{g/2} Sin\left(\frac{\pi z}{L} + \phi\right) dz \quad (4.14)$$

ஆகும்.

$$\therefore \Delta T = q\mathcal{E}_m \frac{2L}{\pi} Sin\left(\frac{\pi g}{2L}\right) Sin\,\phi \quad (4.15)$$

'g' நீளமுடைய இடைவெளியின் ஊடேயுள்ள மின்னழுத்தம்

$$V_m = g\mathcal{E}_m \quad (4.16)$$

ஆகவே, உரிய கலைக்கோணத்துடன் இடைவெளியைத் துகள் நாடுமானால், அது ஈட்டும் ஆற்றல்,

$$\Delta T = qV_m \frac{2L_n}{\pi g_n} Sin\left(\frac{\pi g_n}{2L_n}\right) Sin\,\phi \quad (4.17)$$

அதாவது,

$$\Delta T = qV_m \left[\frac{Sin\left(\frac{\pi g_n}{2Ln}\right)}{\frac{\pi g_n}{2L_n}}\right] Sin\,\phi \quad (4.18)$$

எனவே, விதரோவின் பொறியில் q மின்னூட்டமுடைய துகள்ஒன்று, ஒவ்வொரு இடைவெளியைக் கடக்கும் போதும் ஈட்டும் ஆற்றல் ΔT ஐச் சமன் 4.18 - லிருந்து பெறலாம்.

4.4 அல்வாரெஸின் நேரியல் முடுக்கி (Alvarez Linear Accelerator)

விதரோவின் நேரியல் முடுக்கியிலிருந்து மாறுபட்டது அல்வாரெஸின் பொறியாகும். முதன்முதலாக உருவாக்கப்பட்ட

நேரியல் முடுக்கிகள் குறைபாடுகள் உடையனவாக இருந்தன. புரோட்டான்களை முடுக்குவதற்கு 200 மெகாஹெர்ட்ஸ்கள் அளவிலான ரேடியோ அதிர்வெண் அலைவான் தேவைப்பட்டது. இந்த அதிர்வெண்ணில் பொறி இயங்கும்போது பெருமளவில் மின்திறன் வீணாகும். மேலும், கதிர்வீச்சின் காரணமாக அமைப்பு முழுதுமே பெருமளவில் ஆற்றலை இழக்க நேரிடும். இந்தக் காரணங்களால் புரோட்டானை முடுக்கப் புதுமுயற்சிகள் தோன்றலாயின.

விதரோவின் பொறியில் புறமின் இயற்றி (*External Generator*) ஒன்றில் தோன்றும் அலையும் மின்புலத்தால், நகர்வு குழாய்கள் மின்னூட்டம் பெற்றன. அல்வாரெஸின் பொறியிலோ உலோக ஒத்திசைவு உட்குழிவிற்குள் (*Metal Resonant Cavity*) நிலைமின்காந்த அலை (*Standing Electro Magnetic Wave*) ஒன்று தோற்றுவிக்கப் பட்டது.

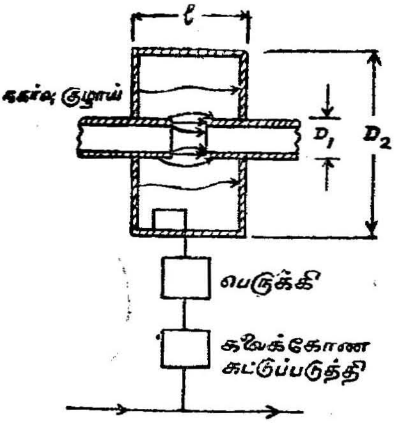
ஒலி அலைகளானது இசைக்குழாயினுள் (*Organ Pipe*) தோற்றுவிக்கப்படுவதைப் போன்று, மின்காந்த அலைகள் உட்குழிவினுள் தோற்றுவிக்கப் படுகின்றன. '$2b$' விட்டமுடைய உருளை வடிவ உட்குழிவானது (*Cylindrical Cavity*) λ அலைநீளமுடன் அலைவுறுமானால் $\lambda = 2\cdot 61b$ ஆகும்.

காந்தப்புலம் உருளையின் சுவர்ப் பகுதிகளில் பெருமமாகவும், அச்சுப் பகுதியில் சுழியமாகவும் அமையும். மின்புலமோ அச்சுப் பகுதியில் பெருமமாகவும், சுவர்ப்பகுதியில் சுழியமாகவும் அமையும். உட்குழிவின் அச்சினூடே செயல்படும் மின்புலமானது புரோட்டான்களை முடுக்கவல்ல விசையைத் தோற்றுவிக்கின்றது. இத்தகைய அமைப்பிலும் புலத்தின் எதிர்க்குறி அரைவட்டிப்புகளின் (*Negative Half Cycles*) போது, துகளைக் காக்க வல்ல நகர்வு குழாய்கள் தேவை.

இனி, அல்வாரெஸ் பொறியின் அடிப்படைத் தத்துவத்தை ஆராய்வோம். படம் 4.3 -ல் உள்ளவாறு அடுத்தடுத்து அமைந்த இரு நகர்வு குழாய்களின் முனைகளை மின்ஏற்பியின் (*Capacitance*) இரு தகடுகளாகக் கருதலாம். அம்முனைகளுக்கிடையே உள்ள மின்னழுத்த வேறுபாடு V, அதிர்வெண் ν. அந்த மின்னேற்பியின் மின் ஏற்புத் திறன் (*Capacity*) C எனக் கொள்வோம். இரு நகர்வு குழாய்களுக்கும் இடையில் உள்ள மின்னோட்டம் I_d எனக் கொண்டால்,

$$I_d = 2\pi\nu CV \qquad (4.19)$$

I_d - ன் மதிப்பு, பொறியின் அளவுகளின் காரணமாக மிகவும் பெரிதாக அமைந்துவிடும். எனவே, அடுத்தடுத்துள்ள இரு நகர்வு குழாய்களின் இடையில் உள்ள வெளியைப் படம் 4.3-ல் உள்ள வாறு மூடுவதன் மூலமாக, ஓர் உட்குழிவை உருவாக்கலாம். இந்த உட்குழிவு மின்காந்த ஆற்றலை ஏற்கும். இந்த மின் காந்த ஆற்றலின் காரணமாக விளையும் ஒத்திசைவு அதிர் வெண்ணை, மின்புலத்தின் அதிர் வெண்ணுக்குச் சமமாக்கலாம். படம் 4.3 - ல் உள்ளவாறு அமைந்த நகர்வு குழாய்களின் அமைப்பானது, மேற்கூறிய ஒத்திசைவு உட்குழிவின் இயல்பை உடையது எனலாம். இதில் உட்குழிவின் நீளமும் (l) நகர்வு குழாயின் நீளமும் சமமாக உள்ளன.



படம் 4.3 புரோட்டான் நேரியல் பொறியின் உட்குழிவு

நகர்வு குழாயின் விட்டம் D_1 எனவும், உட்குழிவின் விட்டம் D_2 எனவும் கொள்வோம் (படம் 4.3). உட்குழிவினுள் அமைந்த ஊடகத்தின் காந்த உட்புகு திறனை (*Magnetic Permeability*) μ எனக் குறிப்போம். இத்தகு ஓரச்சு அமைப்பின் (*Coaxial System*) மின் நிலைமம் (*Inductance*)

$$L = \frac{\mu}{2\pi} l \; ln \frac{D_2}{D_1} \tag{4.20}$$

ஆகும். ஒத்திசைவு நிகழவேண்டுமெனில்

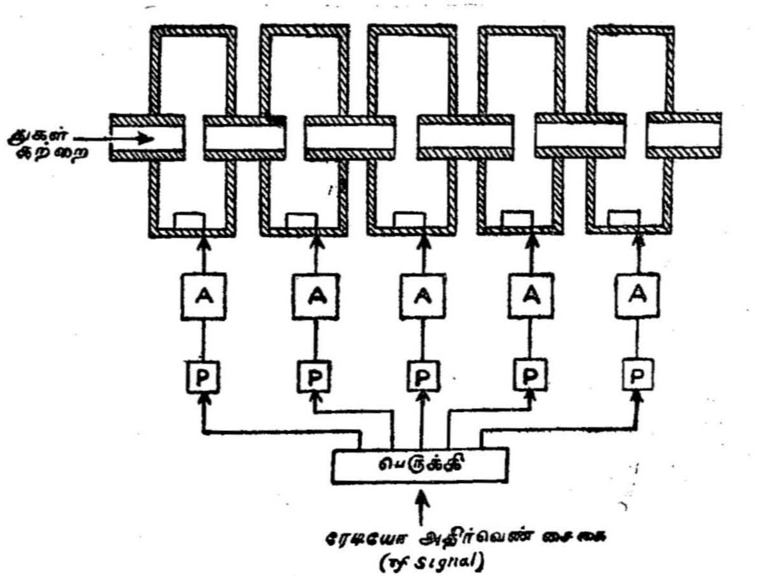
$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

அல்லது

$$4\pi^2\nu^2 LC = 1 \tag{4.21}$$

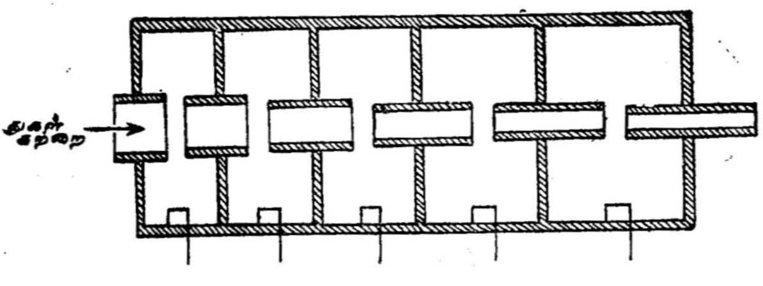
ஆகும்.

சமன்கள் 4.20-ம், 4.21-ம் உட்குழிவின் அளவுகளை வரையறுக்கின்றன. படம் 4.3-ல் உள்ளதுபோன்ற அமைப்புடைய பகுதிகளைத் தொடராக வைத்து உருவாக்கப்பட்ட நேரியல் பொறியைப் படம் 4.4-ல் காணலாம். இதில் ஒவ்வொரு உட்குழிவும் ஒரு பெருக்கியினால் மின்னூட்டம் பெறுகின்றன. எல்லாப் பெருக்கிகளும் ஒரேயொரு இயற்றியினால் இயக்கப்படுகின்றன. இவ்வாறு தனித்தனியான



படம் 4.4 நகர்வு குழாய்களும், ஒத்திசைவு உட்குழிவுகளும் அமைந்த பொறி

உட்குழிவுகளுக்குப் பதிலாக, வேறு முறையிலும் குழிவுகளை அமைக்கலாம். அடுத்தடுத்து உள்ள உட்குழிவுகள் பொதுவான சுவர்களை உடையனவாகவும், எல்லாச் சுவர்களின் புறவிட்டம் ஒரு மாறிலியாக இருக்கும்படியும் அமைக்கலாம். இவ்வாறு அமைந்த நேரியல் பொறியைப் படம் 4.5 ல் காணலாம்.

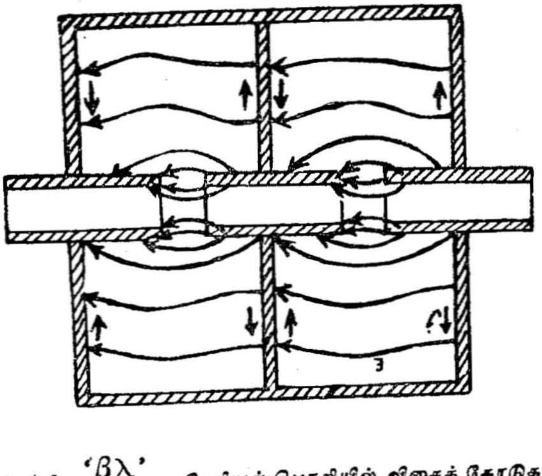


படம் 4.5 நகர்வு குழாயின் நீளமும், விட்டமும்

நேரியல் பொறியில் அடுத்தடுத்துள்ள நகர்வு குழாய்களின் நீளம் படிப்படியாக அதிகரிக்க வேண்டுமாதலால், உட்குழிவின் நீளமும்

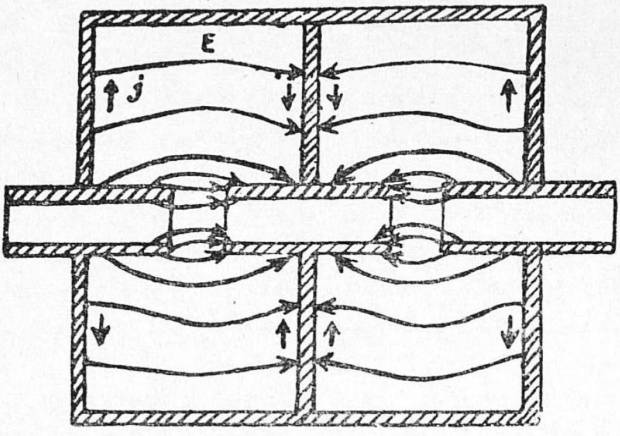
அதிகரிக்கவேண்டும். எனவே சமன் 4.20-லிருந்து மின்நிலைமமும் அதிகரித்துக் கொண்டே போகும் என்று கூறலாம். இதனால் சமன் 4.21-ன்படி அமைய வேண்டிய ஒத்திசைவு நிகழாமல் போகலாம். ஆகவே, இந்த மாற்றங்களால் ஒத்திசைவு குலையாமலிருக்க C-ன் மதிப்பைத் தகுந்தபடி குறைக்கவேண்டும். நகர்வு குழாயின் விட்டம் குறையும்போது C-ன் மதிப்பும் குறையுமாதலால், நகர்வு குழாய்களின் விட்டத்தை உரிய முறையில் குறைப்பதன் மூலமும் ஒத்திசைவை நீடிக்க வைக்கலாம். இத்தகு அமைப்புடைய பொறியைப் படம் 4.5-ல் காணலாம்.

இனி, விதரோவின் பொறியில் உள்ளவாறு (படம் 4.2) அடுத்தடுத்த இடைவெளிகளில் மின்புலத்தின் கலைக்கோணங்கள் வெவ்வேறாக அமையுமானால், மின்விசைக் கோடுகள் படம் 4.6-ல் உள்ளவாறு அமையும். மேலும், துகள் முடுக்கம் பெற L (கூறு நீளம்) ஆனது $\frac{\beta\lambda}{2}$ மதிப்பைப் பெறவேண்டும் எனவும் கண்டோம்.



படம் 4.6 $\frac{\beta\lambda}{2}$ நேரியல் பொறியில் விசைக் கோடுகள்

ஆனால், அவ்வாறன்றி எல்லா இடைவெளிகளிலும் மின்புலம் அதே கலைக் கோணத்தில் இருக்குமானால் மின்புல விசைக்கோடுகள் படம் 4.7-ல் உள்ளவாறு அமையும். இந்நிலையில் இடைவெளிகளை நாடித் துகள் முடுக்கம் பெறவேண்டுமெனில்,



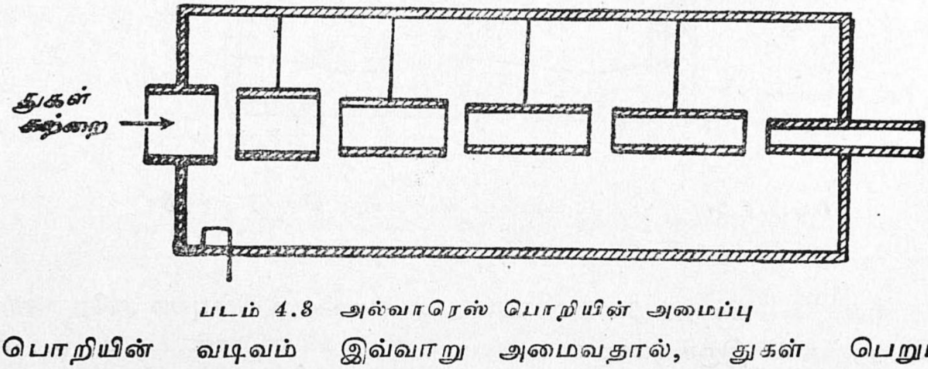
படம் 4.7 '$\beta\lambda$' நேரியல் பொறியில் விசைக்கோடுகள்

$$L_n = v_n\tau = \frac{v_n}{f} = \frac{v_n\lambda}{c}$$

ஆகும். எனவே, $L_n = \beta_n\lambda$ (4.22)

இந்த விதிக்கு உட்படும் நேரியல் முடுக்கி பீட்டா லாம்டா (*Beta Lambda*) பொறி எனப்படும்.

இந்தப் பொறியில் அடுத்தடுத்துள்ள உட்குழிவுகளுக்குப் பொதுவான சுவரின் மேலுள்ள மின்னூட்டத்தைக் கருதுவோம். படம் 4.7-ல் உள்ளவாறு இச் சுவரை வந்தடையும் மின்விசைக்கோடுகள் எவ்வளவோ அதே, அளவு மின்விசைக் கோடுகள் சுவரை விட்டு நீங்குகின்றன. எனவே, இதன் விளைவாகச் சுவரின் ஊடே மின்னூட்டம் பாயாது. எனவே, இத்தகு சுவர்களை விலக்குவதால் மின்காந்தப்புல அமைப்புப் பெரிதும் பாதிக்கப்படாது. ஆகவே, படம் 4.8-ல் உள்ளவாறு பொறியை அமைப்பது உகந்ததாகும்.

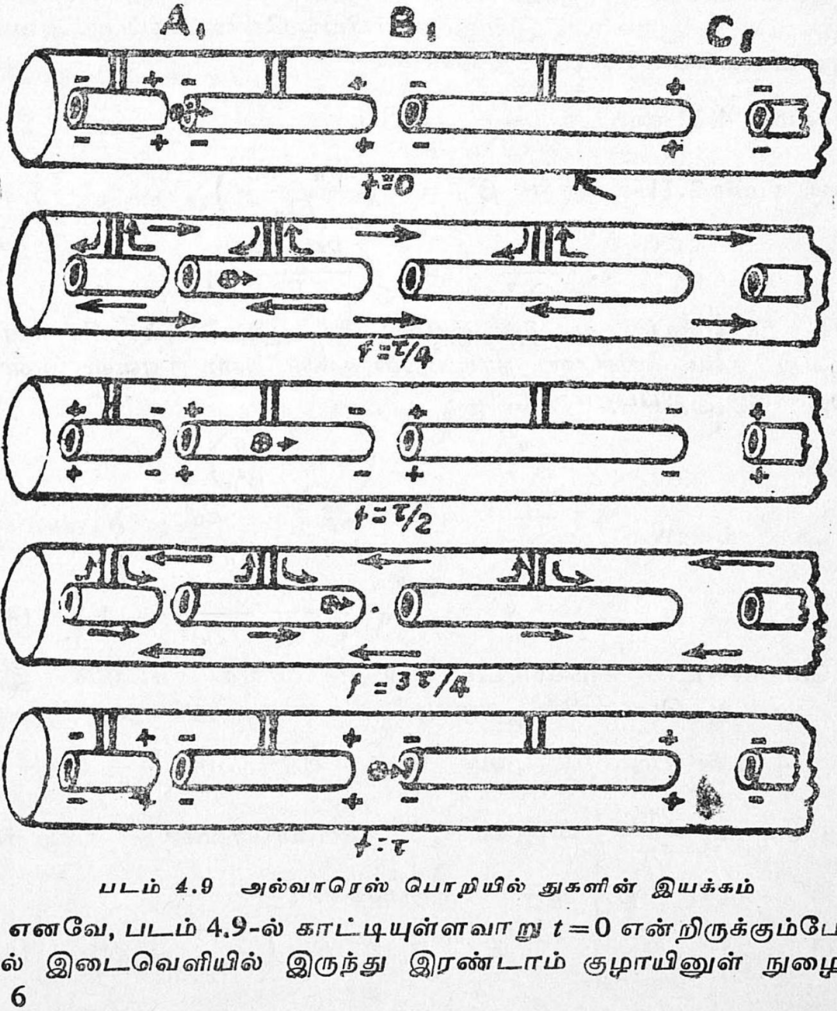


படம் 4.8 அல்வாரெஸ் பொறியின் அமைப்பு

பொறியின் வடிவம் இவ்வாறு அமைவதால், துகள் பெறும் முடுக்கத்தில் மாற்றம் எதுவும் ஏற்படாது. மேலும் சுவர்களினால் தோன்றக்கூடிய இழப்புகள் விலகுவதாலும் பயன் பெறுகிறோம்.

இதைப் போன்ற அமைப்புடைய பொறி அல்வாரெஸ் பொறி என்றும், ஈறிலி கலைக்கோண வேக (*Infinite Phase Velocity*) நேரியல் பொறி என்றும் அழைக்கப் பெறுகின்றது. அரை பீட்டா லாம்டா (*Half Beta Lambda*) பொறியில் உள்ள பிரிக்கின்ற சுவர்களை, இவ்வாறு விலக்குதல் முடியாது என்பதைக் கருத்திற் கொள்ள வேண்டும்.

பீட்டா லாம்டா பொறியில் துகளானது நகர்வு குழாயினுள் இயங்கத் தேவைப்படும் நேரமும், அலைவானின் நேரம் τ-ம் ஒன்ருகவே இருக்கவேண்டும் என அறிகிறோம். இவ்விதம் அமைந்தால்தான், அல்வாரெஸின் பொறியில், துகளானது, இடைவெளியை உரிய நேரத்தில் நாடித் தேவையான முடுக்கம் பெறும்.



படம் 4.9 அல்வாரெஸ் பொறியில் துகளின் இயக்கம்

எனவே, படம் 4.9-ல் காட்டியுள்ளவாறு $t=0$ என்றிருக்கும்போது முதல் இடைவெளியில் இருந்து இரண்டாம் குழாயினுள் நுழையத்

தொடங்கும் துகள் τ நேரம் கழித்து இரண்டாம் இடைவெளி B_1-ஐ அடைவதைக் காணலாம். அதாவது $t=o$ ஆக இருக்கும் போது முதல் இடைவெளியில் முடுக்கம் பெற்ற துகள் $t=\tau$ ஆனபோது, இரண்டாம் இடைவெளியில் முடுக்கம் பெறுகின்றது. இதைப் போலவே $t=2\tau$ ஆனவுடன் மூன்றும் இடைவெளியை நாடித் துகள் முடுக்கம் பெறும். இதுவே அல்வாரெஸ் நேரியல் பொறியின் இயக்கமுறையாகும்.

4.5. அல்வாரெஸ் பொறியில் துகளின் ஆற்றல்

அல்வாரெஸின் நேரியல் பொறியில், துகள் பெறும் ஆற்றலைப் பற்றிக் காண்போம். இப் பொறியில் துகள்கள் மிகுந்த வேகத்தைப் பெறவல்லன ஆதலால், இங்குச் சார்பியல் கொள்கைப்படி அமைந்த கோவைகளையே பயன்படுத்துவோம்.

சமன் 4.22-லிருந்து $\dfrac{L^2_n}{\lambda^2} = \beta^2_n$

ஆனால் சமன் 2.11-லிருந்து $\beta^2_n = \left(\dfrac{E^2_n - E_0^2}{E^2_n}\right)$

$$\therefore \quad \frac{L^2_n}{\lambda^2} = \left(\frac{E^2_n - E_0^2}{E^2_n}\right)$$

இதில் E_0 என்பது துகளின் ஓய்வு நிலை ஆற்றலையும், E_n என்பது n ஆவது இடைவெளியை நாடியபின் துகள் அடைந்துள்ள மொத்த ஆற்றலையும் குறிப்பதாகும்.

$$\frac{L_n^2}{\lambda^2} = \left(1 - \frac{E_0}{E^2_n}\right)$$

$$= \left\{1 - \frac{E_0^2}{(T_n+E_0)^2}\right\}$$

$$\therefore \quad T_n = E_0 \left\{\frac{\lambda}{(\lambda^2-L^2_n)^{\frac{1}{2}}} - 1\right\} \qquad (4.23)$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டிலிருந்து துகள் ஈட்டும் இறுதி ஆற்றலானது பொறியின் அளவுகளைச் சார்ந்திருப்பது புலனாகும்.

சமன் 4.11 ன் படி மின்புலம் $\varepsilon = \varepsilon_{m^{(z)}} \; Sin\left(\dfrac{z\,\omega_{rf}}{v} + \phi\right)$.

தவிர $\omega_{rf} = \dfrac{2\pi c}{\lambda}$ ஆகவும், அல்வாரெஸின் பொறியில் கூறின் நீளம் $L = \beta\lambda$ ஆகவும் இருப்பதால்,

$$\varepsilon = \varepsilon_{m^{(z)}} \; Sin\left(\frac{2\pi z}{L} + \phi\right) \qquad (4.24)$$

ஆயத்திசையில் z தூரத்தை அளக்கப் பயன்படும் வகையில் மின்மையம் (*Electric Centre*) என்றதொரு கருத்தைக் குறிப்பிடலாம். இந்த மின்மையத்தின் பண்பை

$$\int \varepsilon_{m}(z)\ Sin\left(\frac{2\pi z}{L}\right)dz = 0 \qquad (4.25)$$

என்ற சமன்பாடு வரையறுக்கும். புலம் சீராக அமைந்தால்தான் மின்மையமும் இடைவெளி மையமும், ஒன்றுகப் பொருந்தும்.

ஒரு கூறை, துகள் கடக்கும் போது ஈட்டும் ஆற்றல் $\triangle E$ எனில்

$$\triangle E = q \int_L \varepsilon_m(z)\ Sin\left(\frac{2\pi z}{L} + \phi\right)dz$$

அதாவது, $\triangle E = q\ Cos\ \phi \int \varepsilon_m(z)\ Sin\left(\frac{2\pi z}{L}\right)dz + q\ Sin\ \phi \int \varepsilon_m(z)\ Cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right)dz$

சமன் 4.25 லிருந்து, (4.26)

$$\triangle E = q\ Sin\,\phi \int \varepsilon_m(z)\ Cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right)dz$$

ஆகவே, $\triangle E = q\ Sin\ \phi \left\{ \frac{\int \varepsilon_m(z)\ Cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right)dz}{\int_L \varepsilon_m(z)\ dz} \right\} \int_L \varepsilon_m(z)\ dz$

(4.27)

இச் சமன்பாட்டில் $\dfrac{\int \varepsilon_m(z)\ Cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right)dz}{\int_L \varepsilon_m(z)\ dz}$ எனும் கூறைக் கடக்கும் கால எண் (*Transit Time Factor*) F_1 என்பர்.

எனவே, $\triangle E = q\ F_1\ Sin\phi \int_L \varepsilon_m(z)\ dz$

$$= q\ F_1\ Sin\,\phi \left\{ \frac{\int_L \varepsilon_m(z)\ dz}{\int_L dz} \right\} \int_L dz \qquad (4.28)$$

சமன் 4.28-ல் உள்ள $\dfrac{\int_L \mathcal{E}_{m^{(z)}}\, dz}{\int_L dz}$ என்ற கூறு மின்புல வீச்சின் சராசரி ஆகும். இதை $\mathcal{E}_{mav}$ எனக் குறிப்போம்.

$$\therefore \triangle E = q\, F_1\, \mathcal{E}_{mav}\, L\, Sin\phi \qquad (4.29)$$

செம்மையாக அமைக்கப்பட்ட அல்வாரெஸின் பொறியில், அமைப்பு முழுவதிலும் $\mathcal{E}_{mav}$-ன் மதிப்பும், F_1-ன் மதிப்பும் மாறிலிகளாகும். ஆகவே, இசைவு கலைக்கோணம் ϕ-ம் மாறிலியென்றால் $\triangle E \propto L$ (4.30)

எனவே, ஒவ்வொரு இடைவெளியையும் நாடி துகள் ஈட்டும் ஆற்றல், கூறின் நீளம் L-க்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளதென்பது புலனாகும். ஆகவே, துகள் ஒவ்வொரு இடைவெளியைக் கடக்கும் போதும், துகளின் ஆற்றல் பெருகிக் கொண்டே போகும் என்று அறியலாம். இனி,

$$\gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{Mc^2}{M_0c^2},$$

$$\eta = \frac{p}{M_0c} = \frac{Mv}{M_0c}$$

எனில்.

$$\eta = \gamma\beta \qquad (4.31)$$

மேலும்,
$$M = \frac{M_0}{(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

ஆதலால்,

$$\therefore \left(\frac{M}{M_0}\right)^2 = \gamma^2 = \frac{1}{(1-\beta^2)} \qquad (4.32)$$

எனவே, சமன் 4.31 லிருந்து $\gamma^2 = 1 + \eta^2$

ஆகும். அல்லது,
$$\frac{E^2}{E_0^2} = 1 + \left(\frac{p}{M_0 c}\right)^2$$

$$\therefore \quad E^2 = E_0^2 + E_0^2 . \frac{p^2}{M_0^2 c^2}$$

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2 \qquad (4.33)$$

$$\therefore \quad \frac{E^2 - E_0^2}{E^2} = \frac{p^2 c^2}{E^2}$$

$$\therefore \beta^2 = \frac{p^2 c^2}{E^2}$$

சமன் 4.33 ஐப் பகுதி காணில்,

$$2E \triangle E = 2c^2 p \triangle p$$

$$\therefore \quad \triangle E = \frac{c^2 p}{E} \triangle p \qquad (4.34)$$

சமன் 4.34 ஐப் பின்வருமாறும் எழுதலாம்.

$$\triangle E = c \, \beta \triangle p$$

இச் சமன்பாட்டைச் சமன் 4.29 உடன் ஒப்பிட

$$c \, \beta \triangle p = q \, F_1 \, \varepsilon_{mav} \, L \, Sin \, \phi$$

$$= q F_1 \, \varepsilon_{mav} \, \beta \, \lambda \, Sin \, \phi$$

$$\therefore \triangle p = q F_1 \, \varepsilon_{mav} \frac{\lambda}{c} \, Sin \, \phi \qquad (4.35)$$

'F_1' ஒரு மாறிலி யாகையால், ஒரு கூறைக் கடப்பதினுல் தோன்றக்கூடிய உந்த மாற்றம் $\triangle p$-ம் ஒரு மாறிலியே. ஆகவே ஒவ்வொரு கூறைக் கடக்கும் போதும், துகள் ஈட்டும் உந்தமானது *(Gain in Momentum)* $\triangle p$ யாகவே இருக்கும். எனவே, n-ஆவது கூறைக் கடந்தபின் துகள் பெறும் மொத்த உந்த ஈட்டம்,

$$p_n = n \; q F_1 \, \varepsilon_{mav} \frac{\lambda}{c} \, Sin \phi$$

ஆகும். மேலும்,
$$\eta_n = \frac{p_n}{M_o c}$$

எனில்,

$$\eta_n = \frac{n \, q \, F_1 \, \varepsilon_{mav} \, \lambda \, Sin \phi}{M_0 \, c^2}$$

$$= \frac{nq \, F_1 \, \varepsilon_{mav} \, \lambda \, Sin \phi}{E_0}$$

இதில் $\dfrac{q\,F_i\,\mathcal{E}_{max}\,\lambda\,Sin\phi}{E_0} = x$ எனில்,

$$\eta_n = nx$$

ஆகும். மேலும், $1+\eta^2{}_n = \gamma^2{}_n$

ஆதலால், $(1+\eta^2{}_n)^{\frac{1}{2}} = \gamma_n$

$$= \frac{E_n}{E_0}$$

$$= \frac{E_0 + T_n}{E_0}$$

$$(1+\eta_n^2)^{\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{T_n}{E_0}\right)$$

ஆகவே n கூறுகளைக் கடந்த பின்னுல், துகளின் இயக்க ஆற்றல்,

$$T_n = E_0\,\{(1+\eta^2{}_n)^{\frac{1}{2}} - 1\}$$

$$\therefore \quad T_n = E_0\{(1 + n^2x^2)^{\frac{1}{2}} - 1\} \qquad (4.36)$$

கோவை 4.36-லிருந்து கூறுகளின் எண்ணிக்கைக்கு ஏற்ப, இயக்க ஆற்றல் உயரும் என அறியலாம். மேலும், துகளின் இறுதி ஆற்றலானது பொறியின் அளபுருபுகளைச் சார்ந்தும், துகளின் ஓய்வு ஆற்றலைப் பொறுத்தும் மாறும் என்பது புலனுகும்.

4.6. நேரியல் பொறியில் கூறுகளின் நீளம்

பிற பொறிகளோடு ஒப்பிடும்போது நேரியல் முடுக்கியில் துகள் அடையும் இறுதி ஆற்றல் குறைந்ததாகவே இருக்கும். இந்தக் காரணத்தால் துகளின் நிறையில் குறிப்பிடத்தக்க அளவிற்கு மாற்றம் ஏற்படாது. ஆகவே, ஒவ்வொரு இடைவெளியைக் கடக்கும் போதும் உந்தத்தில் ஏற்படும் மாற்றங்களுக்கு வேகத்தில் ஏற்படும் மாற்றங்களே காரணம் எனலாம். துகளானது ஓய்விலிருந்து இயங்கத் தொடங்குவதாகக் கருதுவோம்.

τ நேரத்தில் முதல் கூறைக் கடந்தபின் துகளின் வேகம்

$\triangle v$ அளவு உயருமானுல், $L_1 = \tau\triangle v$ (4.37)

ஆகும். இரண்டாவது கூறைக் கடந்த பின்னுல் அந்தத் துகளின் வேகம் v_2 எனில், $v_2 = (v_1 + \triangle v)$

$$= (\triangle v + \triangle v) \qquad (4.38)$$

எனவே, $L_2 = \tau v_2$

$$= 2\triangle v\ \tau \qquad (4.39)$$

இவ்வாறே, $L_3 = 3\triangle v\ \tau \qquad (4.40)$

ஆகும்.

இதனால், கூறுகளின் நீளம் $\tau\triangle v$, $2\tau\triangle v$, $3\tau\triangle v$...... என்று படிப்படியாகப் பெருகிக்கொண்டே போகுமென்பது தெளிவாகும். மேலும், அலைவானின் அலைவுநேரம், துகள் ஒவ்வொரு இடைவெளியைக் கடந்தபின் பெறும் வேகஊட்டம் ஆகிய இரண்டும் நகர்வு குழாய் நீளத்தை வரையறுக்கின்றன என்றும் அறியலாம். முதற்கூறின் நீளம் மிகக் குறைவாக இருப்பின், அதற்கேற்ற மிகஅதிக அதிர்வெண் கொண்ட அலைவானை அமைப்பது எளிதன்று. எனவே, முதற்கூறின் நீளம் குறிப்பிட்டதொரு சிறுமமதிப்பைப் பெற்றிருக்க வேண்டும்.

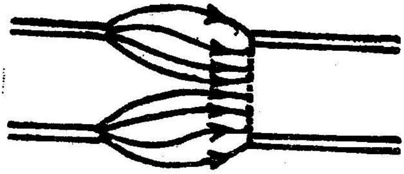
மேலும், நகர்வு குழாயின் நீளம் துகளின் தொடக்க ஆற்றலையும் சார்ந்திருப்பதால், அத் தொடக்க ஆற்றலை அதிகரிப்பதன் மூலம் முதல் குழாயைக் கணிசமான அளவு நீளமுள்ளதாக அமைக்கலாம். வழக்கில், காக்ராஃப்ட் வால்டன் இயற்றியைப் பயன்படுத்தித் துகள்கள் 500 *KeV* முதல் 800 *KeV* வரையிலான தொடக்க ஆற்றலைப் பெறுமாறு செய்யப்படுகின்றன.

4.7. குவிக்கும் விசை

நேரியல் பொறியில் பயன்படும் அலைவுறும் மின்புலத்தின் (*Oscillating Electric Field*) இயல்பினால், இப் பொறியில் உள்ள குழாய் வடிவ மின்முனைகள் குவிக்கின்ற விசையை உருவாக்கா. இடைவெளியின் முதல் பாதியில் ஆரத்திசையில் குவிதலும், (*Focussing*) இரண்டாம் பாதியில் ஆரத்திசையில் குவிதலகற்றலும் (*Defocussing*) இருக்கும். எனவே, புலம் நிலையானதாக இருந்தால், இடைவெளியில் நுழையும் துகள், முதற் பகுதியில் நீண்ட நேரமும் இரண்டாம் பகுதியில் குறைந்த நேரமும் இயங்கும். ஆகவே, குவிக்கின்ற விசையே வலுவுள்ளதாக இருக்கும். எனவே, ஆரத்திசையில் குவிதல் ஏற்படும்.

நேரியல் பொறியில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவத் துகள் இடைவெளியை அணுகும் தருணத்தில், மின்புலம் அதிகரிக்கும் நிலையில் இருக்க வேண்டும் எனக் கண்டோம். எனவே, கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவும் சூழ்நிலையில் இடைவெளியை அணுகும் துகள் ஆரத்திசையில் குவிதலகற்றலை உணரும். ஆகவே, ஆரத்திசையில் குவிதல் நிலவுமெனில், கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவாதெனவும்

கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவுமெனில் ஆரத்திசையில் குவிதல் நிலவாதெனவும் அறியலாம். ஆனால், துகள் உரிய ஆற்றலைப் பெற வேண்டுமெனில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவத்தான் வேண்டும். ஆகவே, குவிதலை உருவாக்க வேறு முறையைக் கையாள வேண்டியுள்ளது.



படம் 4.10 குவித்திடும் கிரிடும் மின்விசைக் கோடுகளும்

படம் 4.10-ல் காட்டியுள்ளவாறு நகர்வு குழாய்களின் நுழைவு முனைகளில் (*Entrance*) உலோகக் கிரிடுகளைப் (*Grids*) பயன்படுத்தலாம். இந்தக் கிரிடுகள் மின்விசைக் கோடுகளின் வளைவு ஆரத்தைக் குறைத்துவிடப் பயன்படும். இதனால், குவிதல் தோன்றும். ஆனால், இவ்விதம் உலோகக் கிரிடுகளைப் பயன்படுத்துவதால் துகளின் ஒரு பகுதி, கிரிடுகளுடன் மோதி இழந்து போகும் வாய்ப்புண்டு. எனவே, ஆற்றல் பெற்றுப் பொறியை விட்டு வெளிவரும் கற்றையின் செறிவு மிகவும் குறைந்ததாகி விடலாம். இதனால் நால்துருவ வில்லைகள் (*Qudrupole Lenses*) குவிதலை உருவாக்கப் பயன்படுத்தப்பட்டன. இதைப்பற்றி அத்தியாயம் 9-இல் காணலாம்.

4.8. கொத்தாக்கிகள் (Bunchers)

புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கியில் ஆரத்திசையில் குவிதலை உருவாக்க நால்துருவக் காந்த வில்லைகளைப் பயன்படுத்தினாலும், துகள்கள் நகர்வு குழாயை அடையாமல் தவறிப்போகும் வாய்ப்புண்டு. தவிர, கலைக்கோண நிலைப்பாடு கொண்ட துகள்கள் மட்டுமே நேரியல் பொறியில் இயங்கி ஆற்றல் பெறலாம். இவற்றின் காரணமாகக் குறிப்பிட்டதொரு வரம்பிற்குள் அடங்கும் துகள்கள் மட்டுமே நேரியல் பொறியினுள் நுழையத் தகுந்தவையாகும். எனவே உட்செலுத்தியிலிருந்து (*Injector*) வரும் துகள்களைப் பொறியினுள் நுழையும் முன்பாகச் சீர்மை பெறச் செய்யவேண்டியுள்ளது. இதற்காகக் கொத்தாக்கிகள் பயன்படுகின்றன.

உட்செலுத்திக்கும் நேரியல் முடுக்கிக்கும் இடையே ஒரு கொத்தாக்கியை அமைக்கலாம். இக் கொத்தாக்கியும் சிறியதொரு நேரியல் முடுக்கி ஆகும். இதனுள் ஒரேயொரு இடைவெளிதான் இருக்கும். இக் கொத்தாக்கியும் நேரியல் முடுக்கி இயங்கும் அதே

அளவு அதிர்வெண் எல்லையில் இயங்குகின்றது. உட்செலுத்தியிலிருந்து வெளிவரும் இசைவுறுதுகளும் அதற்கு முன்பின்னாக வரும் இசைவுறாத் துகள்களும் கொத்தாக்கியினுள் நுழையும். கொத்தாக்கியானது இம் மூவகைத் துகள்களுக்கும் ஏற்ப, மூன்று விதமாகச் செயற்படும்.

இசைவுறுதுகள் கொத்தாக்கியினுள் நுழையும்போது அதன் புலம் சுழியமாகும். எனவே, கொத்தாக்கியில் இயங்கி வெளிவரும் இத் துகள் எவ்வித மாற்றமும் அடையாமல் நேரியல் பொறியுள் நுழையும். இசைவுறு துகளுக்குமுன் வரும் இசைவுறாத்துகள் கொத்தாக்கியுள் நுழையும்போது கொத்தாக்கியில் செயல்படும் மின்புலம் எதிர்முடுக்கப் பண்படையும். எனவே, வேகம் மிகுந்த துகள், கொத்தாக்கியில் இயங்கி வெளிவரும்போது, வேகம் மட்டுப்பட்டு இசைவுறுதுகளுடன் இணைந்து நேரியல் முடுக்கியில் நுழையும். இசைவுறுதுகளுக்குப் பின்வரும் இசைவுறாத்துகளானது, கொத்தாக்கியில் மின்புலம் முடுக்கப் பண்படையும் தருணத்தில் அதை நாடும். எனவே, வேகம் குறைந்த துகள் கொத்தாக்கியில் இயங்கி வெளிவரும் போது, வேகம் அதிகரிக்கப்பட்டு, இசைவுறுதுகளோடு இணைந்து நேரியல் பொறியில் நுழையும். எனவே, கொத்தாக்கியில் இயங்கி வெளிவரும் எல்லாத் துகள்களும் இசைவு பெற்று உரிய கலைக் கோணத்தில் நேரியல் பொறியில் நுழைந்து ஆற்றல் பெறலாம் என்பது தெளிவாகும்.

4.9. கொத்தகற்றிகள் (De Bunchers)

நேரியல் முடுக்கியானது சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் துகள் செலுத்தியாகப் (*Particle Injector*) பயன்படுகிறது. இம் முடுக்கியைத் துகள் செலுத்தியாகப் பயன்படுத்தும்போது ஒருசில இடையூறுகள் தோன்றலாம். வேகமாக வரும் துகள்களும், மெதுவாக வரும் துகள்களும், இசைவுறு துகளுடன் இணைந்து முடுக்கம் பெற்று நேரியல் முடுக்கியை விட்டு வெளிவரும்போது, துகள்களின் ஆற்றல் பரந்து நிற்கும். எனவே, இவ்வகைத் துகள்களை சிங்க்ரோட்ரானில் முடுக்க இயலாது. நேரியல் பொறியிலிருந்து வெளிவரும் துகள் கற்றை சிங்க்ரோட்ரானில் நுழைவதற்கு முன் கொத்தகற்றியில் நுழைந்து சீர்மை பெற்று வெளிவரச் செய்வதன் மூலம் இந்த இடர்ப்பாட்டை நீக்கலாம். வேகம் மிகுந்த துகள், கொத்தகற்றியினுள் நுழையும்போது புலம் எதிர்முடுக்கப் பண் படையும். எனவே, இந்தத் துகளின் வேகம் குறைவுபடும். வேகம் குறைந்த துகள், கொத்தகற்றியினுள் நுழையும்போது புலம் முடுக்கப் பண்படையுமாதலால் அதன் வேகம் மிகும். எனவே, கொத்தகற்றியை விட்டு வெளிவரும் எல்லாத் துகள்களும் ஒருபடித்தான தன்மையடையும். இத்தகு துகள்களைச் சிங்க்ரோட்ரானில் முடுக்கம் பெறச் செய்தல் எளிதாகும்.

4.10. குறிப்பிடத்தக்க சில புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கிகள்

பெர்க்கிலியில் உள்ள 6*BeV* பீட்டாட்ரானில் உட்செலுத்தியாகப் பயன்படும் 10 *MeV* நேரியல் முடுக்கியின் நீளம் 5·486 மீட்டர் ஆகும். இப் பொறியில் 44 நகர்வு குழாய்கள் உள்ளன. இடைவெளி நீளத்திற்கும் (*Gap Length*), கூறின் நீளத்திற்கும் (*Cell Length*) உள்ள தகவு 0·25 ஆகும். இதில் குவிதலை உருவாக்கக் கிரிடுகள் (*Grids*) பயன்படுகின்றன. 500 கிலோவாட் பெருமத்திறனுடைய (*Peak Power*) மூன்று டிரையோடு அலைவான்கள் இப்பொறியில் பயன்படுகின்றன. இந்த அலைவான்களின் அதிர்வெண் 202·5 மெகாஹெர்ட்ஸ் ஆகும். காக்ராஃப்ட் - வால்டன் பொறியிலிருந்து 500 *MeV* ஆற்றலுடைய புரோட்டான்கள் இந் நேரியல் முடுக்கியினுள் செலுத்தப்படுகின்றன. கொத்தாக்கி பயன்படுத்தப்படாதபோது 10 *MeV* ஆற்றல் பெற்ற புரோட்டான்கள், 75 மைக்ரோ ஆம்பியர் மின்னோட்டமுடன் வெளி வந்தன. கொத்தாக்கி பயன்படுத்தப்பட்ட போது பெரும மின்னோட்டம் 225 மைக்ரோ ஆம்பியர் ஆனது.

68*MeV* புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கியொன்று மின்னச்சோட்டா பல்கலைக் கழகத்தில் (*University Of Minnesota*) உள்ளது. இது மூன்று பகுதிகளாகக் கட்டப்பட்டுள்ளது. முதற்பகுதி 5·486 மீட்டர் நீளமுடையது. பிற இருபகுதிகளும், 12·192 மீட்டர் நீளமுடையன. மூன்று பகுதிகளும் எஃகுத் தொட்டியொன்றில் தாங்கப்பட்டுள்ளன. மூன்று பகுதிகளிலும் உள்ள நகர்வு குழாய்களின் எண்ணிக்கை முறையே 42, 35, 25 ஆகும். முதற்பகுதியில் உள்ள நகர்வு குழாய்களின் நீளம் ·03683 மீட்டரிலிருந்து 0·1598 மீட்டர் வரை படிப்படியாக அதிகரிக்கின்றது. இரண்டாம் பகுதியில் உள்ள நகர்வு குழாய்களின் நீளம் 0·1598 மீட்டரிலிருந்து 0·3147 மீட்டர்வரை படிப்படியாக அதிகரிக்கின்றது. மூன்றும் பகுதியிலோ நகர்வுகுழாய்களின் நீளம் 0·3136 மீட்டர் முதல் 0·4011 மீட்டர் வரை வேறுபடுகின்றது. முதற்பகுதியில் நகர்வு குழாய்களின் விட்டம் 0·1402 மீட்டரிலிருந்து 0·06146 மீட்டர்வரை குறைகிறது. இரண்டாம் பகுதியில் உள்ள நகர்வு குழாய்களின் விட்டமோ 0·1669 மீட்டரிலிருந்து 0·06451 மீட்டர் வரை குறைகிறது. மூன்றும் பகுதியில் நகர்வு குழாய்களின் விட்டம் 0·1432 மீட்டர் முதல் 0·09906 மீட்டர் வரை குறைகின்றது. மூன்று பகுதிகளுக்கும் தேவையான திறன் முறையே 600 *kW*, 2,200*kW*, 3,200*kW*, ஆகும். மூன்று பெருக்கிகளை (*Amplifier*) இயக்கும் ஓர் அலைவானிலிருந்து இத் திறன் பெறப்படுகின்றது. அலைவானின் அதிர்வெண் 202·55 மெகாஹெர்ட்ஸ் ஆகும். இப் பொறியிலும் குவிதலைத் தோற்றுவிக்க கிரிடுகள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. முதற் பகுதியில் இருந்து வெளிவரும்

புரோட்டான்களின் ஆற்றல் 10*MeV* ஆகும். இரண்டாம் பகுதியில் இருந்தும், மூன்றும் பகுதியில் இருந்தும் வெளிவரும் புரோட்டான் களின் ஆற்றல் முறையே 40 *MeV*, 68 *MeV* ஆகும்.

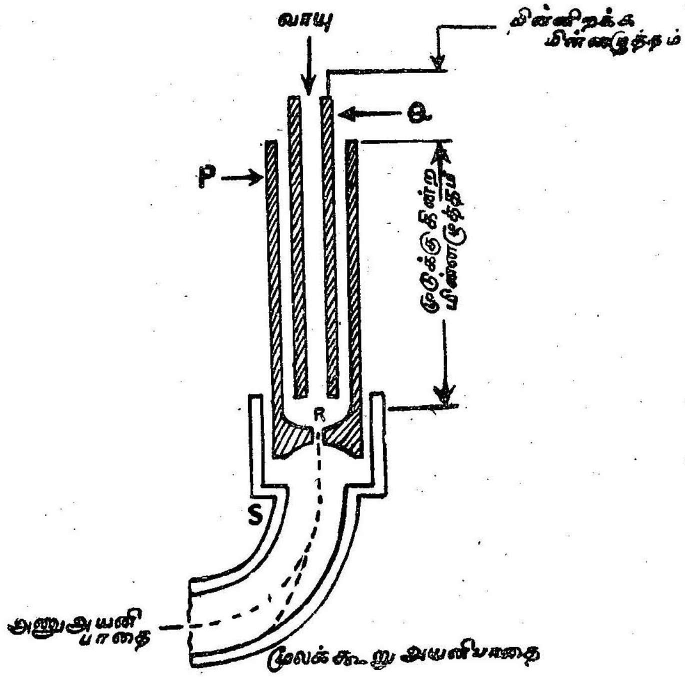
இங்கிலாந்தில், ஹார்வர்டில் உள்ள ருதர்ஃபோர்டு உயர் ஆற்றல் ஆய்வகத்தில் (*Rutherford High Energy Laboratary*), 50 *MeV* புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கியொன்று உள்ளது. இப் பொறியும் மூன்று பகுதிகளைப் பெற்றிருக்கிறது. இவற்றினின்றும் பெறப்படும் ஆற்றல்கள் முறையே 10 *MeV*, 30 *MeV*, 50 *MeV* ஆகும். முதல் பகுதியில் கிரிடின் மூலமாகவும், பிற இரு பகுதிகளிலும் நால்துருவக் காந்த வில்லைகளாலும் குவிதல் உருவாக்கப் படுகின்றது.

4.11. அயனி வாய்கள் (Ion Sources)

முடுக்கும் பொறிகள் யாவும் அயனிகளைத் தோற்றுவிக்கும் அயனிவாய் (*Ion Source*) ஒன்றைப் பெற்றிருக்கும். முடுக்கப்பட வேண்டியது எலெக்ட்ரான்கள் எனில், சூடேற்றப்பட்ட இழையை (*Hot Filament*) அயனிவாயாகப் பயன்படுத்தலாம். இந்த இழை யிலிருந்து வெப்ப அயனி வெளியிடுதல் (*Thermionic Emission*) முறையில் வெளியாகும் எலெக்ட்ரான்கள் பல மின்முனைகளால் குவிக்கப்பட்டுப் பின்னர் பொறியினுள் செலுத்தப்படும். மேலும், அயனிவாயில் செலுத்தப்படும் வாயுவின் மூலக் கூறுகளைத் தேவையான முறையில் அயனியாக்கத்திற்கு உள்ளாக்குவதன்மூலம் நேர் அயனிகளை உருவாக்கலாம். இவ்வாறு அயனியாக்கம் மூலம் தோன்றும் அயனிகளை, அயனிவாயில் இருக்கும் துளையொன்றின் வழியாக, உரிய மின்னழுத்தமுடைய மின்முனையொன்றின் மூலம் வெளியேற்றி முடுக்கும் பொறியினுள் செலுத்தலாம். இனி, அயனிவாயாகச் செயற்படும் ஒருசில கருவிகளின் அமைப்பைக் காணலாம்.

4.12. மின்னிறக்கக் குழாய்கள் (Discharge Tubes)

அயனிப்படுத்த வேண்டிய வாயுவில் மின்னிறக்கம் (*Discharge*) உருவாக்கப்படுவதன் மூலம் அயனிகள் தோற்றுவிக்கப்படலாம். இவ் விதம் மின்னிறக்க முறையைப் பயன்படுத்தும் அயனி வாய்கள், உயர் மின்னழுத்த அயனிவாய்கள், குறைந்த மின்னழுத்த அயனிவாய்கள், என்ற இரு பிரிவிற்குள் அடங்கும். உயர் மின்னழுத்த அயனிவாயில் குறைந்த மின்னோட்ட மின்னிறக்கமும், குறைந்த மின்னழுத்த அயனிவாயில் வில் மின்னிறக்கமும் (*Arc Discharge*) செயல்படுத்தப் படுகின்றன. முதல்வகை அயனிவாய்கள் 10முதல் 20*kV* மின்னழுத் தத்தைப் பயன்படுத்துகின்றன. இனி, ஒலிபன்ட் (*Oliphant*) ருதர்ஃபோர்டு என்னும் இருவராலும் அமைக்கப்பட்ட அயனிவாயின் அமைப்பைக் காணலாம்.



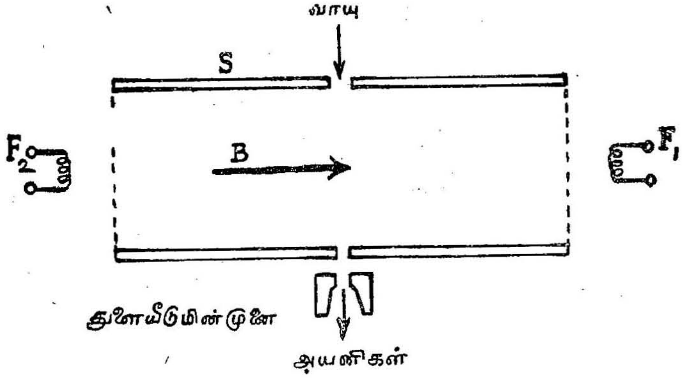
படம் 4.11 ஒலிபன்ட்-ரூதர்ஃபோர்டின் உயர்மின்னழுத்த அயனிவாய்

இந்த அயனிவாயில் *P*, *Q* என்ற இரு, ஒரு மைய (*Concentric*) உருளை வடிவ மின்முனைகள் உள்ளன. அவற்றிற்கு இடையிலுள்ள மின்னழுத்த வீழ்ச்சி (*Potential Drop*) 10 முதல் 20*kV* ஆகும். இரு உருளைகளுக்கும் இடையே மிகக் குறைந்த அளவே இடைவெளி இருக்கும். இதனால், இரண்டு உருளைகளுக்குமிடையே உள்ள வெளியில் மின்னிறக்கம் நிகழ்வதில்லை. *P*-ன் அடிப்பாகத்தில் *R* என்னுமொரு துளை உள்ளது. மின்விசைக் கோடுகள் *R*க்கு அருகில் குவியும்படி பொறி அமைக்கப்பட்டுள்ளது. எனவே *Q*-க்கும், *P*-யின் அடிப்பாகத்திற்குமிடையே வலுவான மின்னிறக்கம் உருவாகும். இதன்பயனாகத் தோன்றும் அயனிகளின் ஆற்றல் சீராகப் பரந்திருக்கும்.

இவ்வாறு வெளிவரும் அயனிகள் *R*க்கும் *S*க்கும் இடையே உள்ள பகுதியில் முடுக்கப்பட்டு, அயனிவாயிலிருந்து வெளியிழுக்கப் படுகின்றன. இவ்வாறு வெளிவரும் அயனிகளில் மூலக்கூறு அயனிகளும் இருக்கலாம். காந்தப் புலமொன்று செயல்படுத்தப் பெற்று, இந்தத் தேவையற்ற மூலக்கூறு அயனிகள் விலக்கப்பெறும் (படம் 4.11). மேலும், அயனிவாயின் சுவரிலிருந்து வெளிவரும் அயனிகள், மின்னிறக்கத்தால் உருவாகும் அயனிகளுடன் சேரலாம். இதைத் தவிர்க்க, அயனிவாய்ச் சுவர்கள் சில பூச்சுகளால் பூசப் பட்டிருக்கும்.

குறைந்த மின்னழுத்த அயனிவாய்கள் வில் மின்னிறக்க (*Arc Discharge*) முறையையும், 100 *kV* மின்னழுத்தத்தையும் பயன் படுத்துகின்றன. வில்லில், கேதோடு (*Cathode*) ஆனது வெப்பஅயனி வெளியிடுதல் முறையில், எலெட்ரான்களைத் தோற்றுவிக்கின்றது. துளையீடு மின்முனை (*Probe Electrode*) ஒன்று குறைந்த எதிர் மின்னழுத்தத்துடன் அயனி அடர்த்தி அதிகமாக உள்ள இடத்தில் வைக்கப்பட்டுள்ளது. உருவாகும் அயனிகள் இந்தத் துளையீடு மின்முனையால் வெளியிழுக்கப்படுகின்றன. இவ்வகை அயனிவாய்கள் உயர்ந்த அயனிச் செறிவையும் (*High Ion Intensity*) சீரானதொரு ஆற்றல் பரவலும், உடையன. ஆனால், இப் பொறியில், அயனிகள் கேதோடின்மேல் மோதும் வாய்ப்புள்ளதால், கேதோடின் வாழ்வுக் காலம் (*Life Time*) குறைந்ததாகவே இருக்கும்.

மின்னிறக்க முறையைப் பயன்படுத்தி அயனிகளை உருவாக்கப் பயன்படும் மற்றொரு அயனிவாயை இனிக் காண்போம். இந்த அயனிவாயில் F_1, F_2 என்ற இரு சூடேற்றப்பட்ட உலோக இழைகள் உள்ளன. இவை எலெக்ட்ரான்களை வெளியிடுகின்றன. *S*-என்பது ஓர் உலோகப் பெட்டியாகும். இந்தப் பெட்டி நேர் மின்னழுத்தத்தில் வைக்கப்பட்டுள்ளது (படம் 4.12). எலெக்ட்



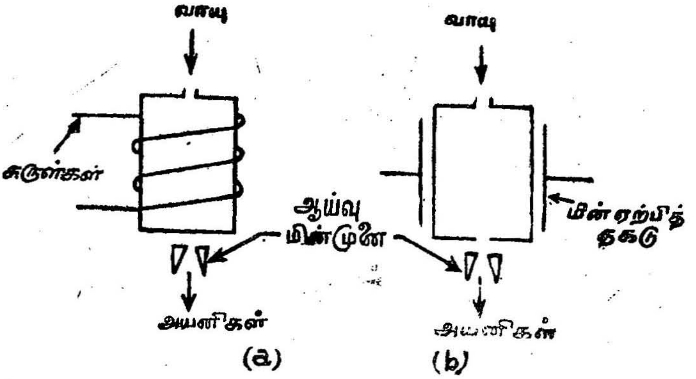
படம் 4.12 எலெக்ட்ரான் அலைவு அயனிவாய்

ரான்கள் நுழைய வசதியாக இருக்கும் பொருட்டு இழைகளை நோக்கியுள்ள பெட்டியின் பக்கங்கள் திறந்து வைக்கப்பட்டுள்ளன. இழையிலிருந்து வெளிவரும் எலெட்ரான்கள் பெட்டிக்கும் இழைக்கு மிடையில் உள்ள மின்னழுத்த வேறுபாட்டினால் முடுக்கப்படும். எனவே, அவை பெட்டியுள் நுழைந்து கடக்கும் முன்பு, வாயுவின் மூலக்கூறுகளை ஓரளவு அயனியாக்கத்திற்கு உட்படுத்தும். இதனால் ஆற்றல் இழந்த எலெக்ட்ரான்கள், பெட்டிக்கும் இழைக்கும் இடையிலுள்ள சுணக்கமடையச் செய்யும் (*Retarding*) புலத்தின் ஆதிக்கத்தை விட்டு மீளமுடியாமல் விலக்கப்படுகின்றன (*Repelled*). ஆகவே, இந்த உலோகப் பெட்டியினுள் எலெக்ட்ரான்கள் தடையுறு

அலைவுகளை *(Damped Oscillations)* நிகழ்த்துகின்றன. இதனால் அயனிவாயின் இயக்குதிறம் *(Efficiency)* அதிகமாவதுடன் இழைகளுக்கு அருகில் தோன்றும் சூழ் மின்னூட்டம் *(Space Charge)* காரணமாக அயனிக்கற்றையின் செறிவும் மிகும். இவ்வகை மின்னிறக்கம் *F. M.* பென்னிங் *(Penning)* என்பாரால் உருவாக்கப் பட்டது. இந்த அயனிவாயில் கேதோடு ஆனது அயனி மோதலை அனுபவிப்பதில்லை யாதலால், இது பிற குறைந்த மின்னழுத்த அயனிவாய்களைவிட நீண்ட வாழ்வுக்காலம் பெற்றிருக்கும். இவ்வகை அயனிவாய்கள் எலெக்ட்ரான் அலைவு அயனிவாய்கள் *(Electron Oscillation Sources)* எனப்படும்.

4.13. ரேடியோ அதிர்வெண் அயனிவாய் (Radio Frequency Ion Source)

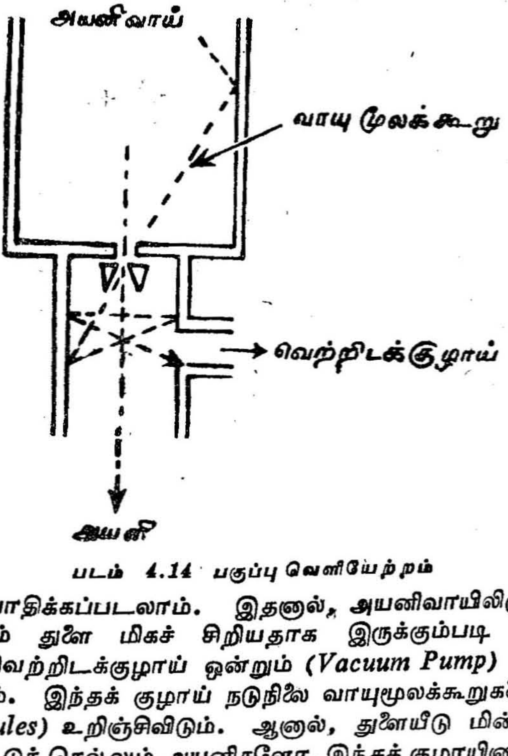
இனி, ரேடியோ அதிர்வெண் அயனிவாயின் அமைப்பைக் காணலாம். இந்த அயனிவாயில் உயர் அதிர்வெண் மின்புலத்தினால் அயனியாக்கம் நிகழ்கின்றது. மின் ஏற்பியோ அல்லது மின்சுருளோ உடைய அலைகின்ற சுற்று *(Oscillating Circuit)* ஒன்றினால் ரேடியோ



படம் 4.13 ரேடியோ அதிர்வெண் அயனிவாய்

அதிர்வெண் மின்புலம் தோற்றுவிக்கப்படும். அயனியாக்கம் பெற வேண்டிய வாயுடைய குழாயைப் படம் 4.13 *(a)*ல் காட்டியுள்ளவாறு சுருளுக்குள்ளேயோ, அல்லது படம் 4.13 *(b)*-ல் காட்டியுள்ளவாறு மின்ஏற்பித் தகடுகளுக்கிடையேயோ அமைக்கலாம். இந்தக் குழாய் வைக்கப்பட்டுள்ள இடத்தில் வலுவான மின்காந்தப்புலம் செயல் படுவதால், அயனியாக்கம் நிகழ்ந்து அயனிகள் தோன்றுகின்றன. இந்த அயனிகள் துளையீடு மின்முனை மூலம் வெளியேறும். இவ்வகை அயனிவாயில் கேதோடு வாழ்வுக்காலம் பற்றிய பிரச்சினையில்லை. மேலும், உலோகப் பெட்டி பயன்படாத காரணத்தால், பெட்டியின் சுவரிலிருந்து வரும் அயனிகள், அயனியாக்கம் மூலம் தோன்றும் அயனிகளுடன் கலக்குமோ என்ற அச்சமும் தேவையில்லை.

எவ்வகை அயனிவாயினுள்ளும் வாயுவின் அழுத்தம் மிகக் குறைவாகவே இருக்கும் ($\approx 10^{-2}$ மி.மீ. *Hg*). ஆனால், இதையும் விடக் குறைவான அழுத்தம் பொறியின் உள்ளே இருக்கும். இதனால் அயனிவாயிலிருந்து முடுக்கும் பொறிக்குள் வாயுவின் தொடர்ச்சியான ஓட்டம் இருக்கும். எனவே, அயனிவாயினுள்ளும் தொடர்ச்சியாக வாயு செலுத்தப்படவேண்டும். வாயு பெருமளவில் பொறியுள் நுழையுமானால், பொறியுள் அமைந்த உயர் வெற்றிடம் (*High*



படம் 4.14 பகுப்பு வெளியேற்றம்

Vacuum) பாதிக்கப்படலாம். இதனால், அயனிவாயிலிருந்து வாயு வெளியேறும் துளை மிகச் சிறியதாக இருக்கும்படி செய்யப்படுவதுடன், வெற்றிடக்குழாய் ஒன்றும் (*Vacuum Pump*) பொருத்தப் பட்டிருக்கும். இந்தக் குழாய் நடுநிலை வாயுமூலக்கூறுகளை (*Neutral Gas Molecules*) உறிஞ்சிவிடும். ஆனால், துளையீடு மின் முனையால் முடுக்கப்பட்டுச் செல்லும் அயனிகளோ, இந்தக் குழாயினால் பாதிக்கப் படாமல் விரைந்த வேகமுடன் வெளியேறிப் பொறியினுள் நுழையும்.

அயனி வாய்கள் ஏற்றமுடையனவாக அமையப் பின்வரும் பண்புகள் நிலவவேண்டும். அயனிவாய்கள் யாவும் உயர் மின்னூட்டச் செறிவுடையனவாக அமையவேண்டும். அயனி வாயில், மூலக்கூறு அயனிகளைக் காட்டிலும் அணு அயனிகள் அதிகமாக இருக்கவேண்டும். ஆற்றல் சீராகப் பரவியிருக்க வேண்டும். குறைந்த அளவுதான் வாயு பயன்படுத்தப் படவேண்டும். செலவாகும் மின்திறன் (*Electric Power*) குறைந்த அளவே இருப்பதுடன், அயனிவாய் நீண்ட வாழ்வுக்காலம் உடையதாகவும் அமையவேண்டும்,

அட்டவணை 4.1:
புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கியின் இயல்புகள்

அளபுரு	அலகு	பெர்க்கிலி	மினசோட்டா	ஹார்வெல்	*CERN*	புருக்ஹேவன்	பீவாட்ரான் உட்செலுத்தி
உட்செலுத்தப்படும் ஆற்றல்	*MeV*	4	0·5	0·5	0·5		0·46
பெரும ஆற்றல்	*MeV*	10	68	50	50		9·9
அதிர்வெண்	மெகாஹெர்ட்ஸ்	202·5	202·5	202·5	202·5	200	202·5
உட்குழிவுகள்		1	3	3	3	1	1
உட்குழிவு விட்டம்	மீட்டர்	0·98	1·08	1·08/0·8	1·08/0·8	0·9	1·08
நகர்வு குழாய்கள்		46	105	110	110	124	42
குவிக்கும் முறை		கிரிடு	கிரிடு	கிரிடு + இருவாட்டந் தரு வில்லை	கிரிடு + இருவாட்டந் தரு வில்லை	இருவாட்டந் தரு வில்லை	கிரிடு
துடிப்புடைய கற்றை மின்னோட்டம் (Pulsed Beam Current)	மைக்ரோ ஆம்பியர்	60	3				

4.14. எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கிகள் (Electron Linear Accelerators)

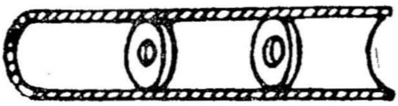
எலெக்ட்ரானின் நிறை புரோட்டான் நிறையைக் காட்டிலும் 1836 மடங்கு சிறியதாகும். இந்தக் காரணத்தால் எலெக்ட்ரான் ஆனது மிகக் குறைந்த ஆற்றலிலேயே சார்பியல் கொள்கைப்படி இயங்கும். காட்டாக 2 *MeV* எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல், அதன் ஓய்வு ஆற்றலைப்போல் 5 மடங்காகும். மேலும், இந்த எலெக்ட்ரானின் வேகம் 0·98*c* ஆகும். ஆனால், புரோட்டான் ஒன்று 467 *BeV* ஆற்றல் அடைந்தால்தான் இவ் வேகத்தைப் பெறும். ஆகவே, எலெக்ட்ரானனது மிகக்குறைந்த ஆற்றல் எல்லையிலேயே சார்பியல் கொள்கைப்படி இயங்கும் என்பது தெளிவாகும். எனவே, எலெக்ட்ரான் ஒன்று முடுக்கம் பெறும்போது, அதன் நிறையில் உயர்வு ஏற்படுமே அல்லாது வேகத்தில் குறிப்பிடத்தக்க மாற்றம் ஏற்படாது.

எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் 1*MeV* - ஐ மிஞ்சும்போது, அதன் $v \approx c$ என்பதனால், $L = \beta\lambda$ என்னும் சமன்பாட்டில் $\beta \approx 1$ ஆகும். எனவே கூறின் நீளம் L ஆனது ரேடியோ அதிர்வெண் புலத்தின் இயல்பு வெளி அலைநீளம் (*Free Space Length*) λ – க்குச் சமமாகும். தவிர, 1 *MeV*க்கும் மேலுள்ள எல்லா ஆற்றல்களுக்கும் நகர்வு குழாயின் நீளம் அதே அளவாக அமைந்துவிடும். இதன்படி அமையும் நகர்வு குழாய்களை, ஒத்திசைவு உட்குழிவினுள் சிற்றுலைவாகக் (*Small Perturbation*) கருத முடியாது. மேலும், உட்குழிவின் விட்டம் நகர்வு குழாயின் நீளத்தைவிடச் சிறியதாகிவிடும். இவ்வித இடர்ப்பாடுகளினால் புரோட்டான் நேரியல் பொறிபோன்ற அமைப்பின்மூலம் எலெக்ட்ரானை முடுக்குதல் இயலாததாகும். எனவே, எலெக்ட்ரானை நேர்கோட்டுப் பாதையிலேயே இயக்கி, ஆற்றல் பெருக்க வேறு வழியை நாட வேண்டியுள்ளது. இதனால் பிறந்த புதிய உத்தி, எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறிக்கென்றே ஒரு தனி அமைப்பைத் தோற்றுவித்தது.

எலெக்ட்ரானின் வேகத்திற்கும், மின்காந்த அலையின் வேகத்திற்கும் உள்ள நெருக்கம் காரணமாக இப் புதிய உத்தி பிறந்தது. புரோட்டான் நேரியல் பொறியில் உள்ளவாறு, மூடப்பட்ட உட்குழிவினுள், ஒரு நிலை அலை (*Standing Wave*)க்குப் பதிலாக, உலோகக் குழாயொன்றின் அச்சின் வழியே, இயங்கும் அலையொன்றைக் கருதலாம். இத்தகு குழாயானது, அலைவழிப்படுத்தி (*Wave Guide*) எனப்படும். இக் குழாயின் விட்டம் இயல்புவெளி அலைநீளத்தை விடச் சிறியதாகும். உதாரணமாக ஸ்டான்ஃபோர்டு (*Stanford*) பொறியிலுள்ள மின்முனையின் விட்டம் 0·08247 மீட்டர் ஆகும். ஆனால், அலையின் நீளமோ 0·105 மீட்டர் ஆகும்.

எலெக்ட்ரான்கள் இந்த வழிப்படுத்தியில் செலுத்தப்பட்டால் அலையின் நீளவாகு மின்புலக் கூறின் (*Langitudinal Component*) ஆதிக்கத்திற்கு உட்படுவதோடு, அவ்வலையோடு சேர்ந்து இயங்கவும் செய்யும். எனவே, எலெக்ட்ரான்கள் தொடர்ச்சியான முடுக்கங்களுக்கு உட்படும். கடலின் அலைகள் நுரையை ஏந்திச் செல்வதைப் போல, இயங்கும் அலையால் எலெக்ட்ரான்கள் இயக்கப்படும். இதன் காரணமாக, இப் பொறிகள் இயங்கும் அலை எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறிகள் (*Travelling Wave Linear Accelerator*) எனவும் அழைக்கப்படும்.

இத்தகு மின்முனையின் அமைப்பைப் படம் 4.15 - ல் காணலாம். அலைவழிப்படுத்தி உள்ளீடு அற்றதாக இருக்குமானால், அலையின்



படம் *4.15* எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியில் முடுக்கும் மின்முனை

கலைக்கோண வேகத்தின் (*Phase Velocity*) மதிப்பை c க்குச் சமமாக்க முடியாது. இந்தக் காரணத்தினால் நகர்வு குழாயினுள்ளே சமமான தூரங்களில், நடுவில் துளையுள்ள வட்டில்கள் இருக்கும். இந்தத் துளையின் வழியே துகள்கற்றை இயங்கும். இத்தகு வட்டில்களை அமைப்பதனால் அலையின் வேகத்தைத் தேவையான அளவிற்குக் கட்டுப்படுத்தலாம்.

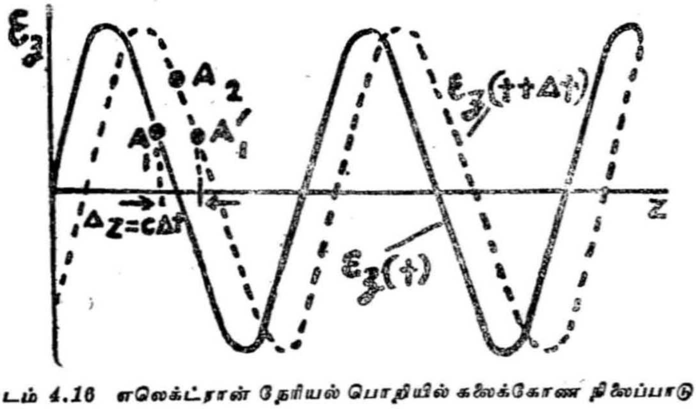
இத்தகு மின்முனையில் இரு வட்டில்களுக்கு இடையேயுள்ள பகுதி ஓர் ஒத்திசைவு உட்குழிவு எனப்படும். வட்டில்களிலுள்ள துளையினூடே மின்காந்த ஆற்றல் செல்வது இயலும். ஓர் உட்குழிவிலிருந்து மற்றொன்றிற்கு மின்காந்த ஆற்றல் செல்லும்போது அலையின் கலைக்கோணம் மாறுபடும். ஆகவே, அலையின் வேகம் ஒளியின் வேகத்தை நெருங்க வாய்ப்புண்டு.

எலெக்ட்ரான் ஒன்று பொறியில் நுழையும் தருணத்தில் அலையின் கலைக்கோண வேகத்தைக் கட்டுப்படுத்தித் துகளின் வேகத்தோடு இசையச் செய்யவேண்டும். முடுக்கம் பெறும் எலெக்ட்ரான் விரைவிலேயே ஒளியின் வேகத்தை அடையுமாதலால், அலையின் கலைக்கோண வேகத்தையும் c யாக்கிவிட வேண்டும். எனவே, அதற்கு ஏற்றவாறு வட்டில்களின் அமைப்பைச் சரிசெய்ய வேண்டும். இதன்மூலம் எலெக்ட்ரானனது அலையோடு சேர்ந்தியங்கி ஆற்றல் பெருக்கும் வாய்ப்புண்டு. அலையின் கலைக்கோண வேகம் c மதிப்பை அடைந்த பின்னர் மாறிலியாக அமையுமாதலால், அந் நிலைக்குப்பின், பொறியின் பகுதிகள் ஒத்த அமைப்புடையனவாக இருக்கும்.

4.15. எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கியில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு (Phase Stability In Electron Linear Accelerator)

எலெக்ட்ரான் உரிய ஆற்றல் பெறவேண்டுமெனில், இந்தப் பொறியிலும் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவவேண்டும். புரோட்டான் நேரியல் பொறிகளில் அமைவது போல் இந்தப் பொறிகளில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு அமைவதில்லை. எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியில் அலையின் வேகம் ஒளியின் வேகம் என்று அறிவோம். இதனால், அலையோடு இசைந்து முடுக்கம் பெறும் இசைவுறு துகளும் ஒளியின் வேகத்தைப் பெறவேண்டும். உண்மையில் எலெக்ட்ரான்கள் இவ் வரம்பை அடைவது இயலாது. எனவே, இசைவுறுதுகள் எவ்விதம் கலைக்கோண நிலைப்பாடு பெறும் எனக் காணலாம்.

புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கியில், நடுநிலைக் கலைக்கோண மதிப்பையொட்டி நிகழும் கலைக்கோண அலைவுகள், இப் பொறியில் நிகழ வாய்ப்பில்லை. எனவே, இப் பொறியில் கலைக்கோண இயக்கம் எப்படி நிகழும் எனக் காண்போம்.



படம் 4.16 எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு

மின்புலம் ε_z ஆனது பொறியினூடே பரவியிருக்கும் விதத்தைப் படம் 4.16 விளக்குகிறது. 't' கணத்தில் மின்புலம் பரவியுள்ள தன்மையும் (தொடர்கோடு), Δt நேரம் கழித்து மின்புலம் பரவியுள்ள தன்மையும் (புள்ளிக்கோடு) இந்தப் படத்தில் காட்டப் பட்டுள்ளது. ஒரே கலைக்கோணம் உடைய A_1, A'_1 என்ற இரு புள்ளிகளைக் கருதுவோம். படத்தில் குறிப்பிட்டுள்ளவாறு $\Delta z = c\Delta t$ ஆகும். பொறியில் நுழையும் தருணத்தில் துகள்கள் அலையைவிட வேகம் குறைந்தவை. எனவே, தொடக்கத்தில் A_1 கலைக்கோணத்தில் பொறியில் நுழைந்த துகள், Δt நேரம் கழிந்தபின் A'_1-ஐ அடையாமல் A_2-ஐ அடையும். ஆகவே, Δt நேரம் கடந்த பின்னால்

எலெக்ட்ரானின் கலைக்கோணம் மாறுபடுகின்றது என்பது புலனாகும். இவ்வாறே எலெக்ட்ரானின் கலைக்கோணம் மாறுபட்டுக் கொண்டே இருக்கும். இவ்வாறு மாறிக் கொண்டே வரும் கலைக்கோணம் வரம்பு மதிப்பு ஒன்றை (*Limiting Value*) அணுகும். இம் மதிப்பை அடைந்தவுடன் முடுக்குகின்ற அலையுடன் எலெக்ட்ரான் பிணைந்து விடும்.

முடுக்கும் பொறியின் அச்சை z அச்சாகக் கருதுவோம். v வேகமுடைய துகள் ஒன்று 't' கால அளவில் z தூரத்தைக் கடப்பதாகக் கொள்வோம்.

எனவே,
$$t(z) = \int_0^z \frac{dz}{v} \tag{4.41}$$
ஆகும்.

இசைவுறு துகள் இதே தூரத்தை v_s வேகமுடன் t_s நேரத்தில் கடந்தால்,

$$t_s(z) = \int_0^z \frac{dz}{v_s} \tag{4.42}$$

எனவே, இந்த இரு சமன்பாடுகளில் இருந்து, ஏதாவதொரு துகளின் கலைக்கோணம்,
$$\phi = \omega\,(t - t_s) + \phi_s \tag{4.43}$$
எனக் கூறலாம். சமன் 4.43-ல் ϕ_s — என்பது இசைவுறு துகளுக்குரிய கலைக்கோணம் ஆகும்.

இனி,
$$\frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi} = \frac{dz}{dt} \cdot \frac{d\phi}{dz}$$
$$= \dot{z}\,\frac{d\phi}{dz} \tag{4.44}$$

சமன் 4.43-லிருந்து,
$$\frac{d\phi}{dz} = \omega\left(\frac{dt}{dz} - \frac{dt_s}{dz}\right)$$
என்று பெறலாம். எனவே,
$$\frac{d\phi}{dt} = \dot{z}\left\{\omega\left(\frac{dt}{dz} - \frac{dt_s}{dz}\right)\right\}$$
$$= \omega v\left(\frac{dt}{dz} - \frac{dt_s}{dz}\right)$$
$$= \omega v\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_s}\right)$$
$$\therefore\ \dot{\phi} = \omega\left(1 - \frac{v}{v_s}\right) \tag{4.45}$$

எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியில் இசைவுறு துகளின் வேகம் $v_s = c$

ஆதலால், $$\dot{\phi} = \omega\left(1-\frac{v}{c}\right)$$

அல்லது, $$\dot{\phi} = \omega\,(1-\beta)$$

$$\therefore \quad \dot{\phi} = \omega \left\{1-\frac{p}{(p^2+M_0^2c^2)^{\frac{1}{2}}}\right\} \tag{4.46}$$

மேலும், துகளின் உந்த மாறுபாடு வீதம், $\dot{p} = \dfrac{dp}{dt}$

$$= \frac{d\phi}{dt}\cdot\frac{dp}{d\phi}$$

$$= \omega \left\{1-\frac{p}{(p^2+M_0^2c^2)^{\frac{1}{2}}}\right\}\cdot\frac{dp}{d\phi}$$

உந்த மாறுபாடு வீதம், துகள் உட்படும் விசைக்குச் சமமாதலால்,

$$\dot{p} = q\,\mathcal{E}\,Sin\,\phi \tag{4.47}$$

அல்லது, $$= \omega \left\{1-\frac{p}{(p^2+M_0^2c^2)^{\frac{1}{2}}}\right\}\frac{dp}{d\phi} = q\,\mathcal{E}\,Sin\,\phi$$

அதாவது, $$\frac{\omega}{q\mathcal{E}}\left\{1-\frac{p}{(p^2+M_0^2c^2)^{\frac{1}{2}}}\right\}dp - Sin\phi\, d\phi = 0 \tag{4.48}$$

தொகுநி காணில்,

$$\frac{\omega}{q\mathcal{E}}\left\{p-(p^2+M_0^2c^2)^{\frac{1}{2}}\right\} + Cos\phi = \text{மாறிலி}$$

$$= \frac{\omega}{q\mathcal{E}}\left\{p_i-(p_i^2+M_0^2c^2)^{\frac{1}{2}}\right\} + Cos\,\phi_i \tag{4.49}$$

இந்தச் சமன்பாட்டில் p_i, ϕ_i இரண்டும் முறையே உந்தம், கலைக் கோணம் இவற்றின் தொடக்க மதிப்புகளைக் குறிக்கின்றன.

முடுக்கம் பெறப்பெற எலெக்ட்ரானின் உந்தம் உயரும். இதனால் $p << M_0c$ ஆகும். ஆகவே, சமன் 4.49-ன் இடப்பக்கக் கோவையில் உள்ள முதலிரண்டு கூறுகளும் மறைந்துவிடும். எனவே, எலெக்ட்ரானனது முடுக்கத்திற்குப்பின் அடையும் கலைக்கோணம் ϕ_f எனில்,

$$Cos\phi_f = Cos\phi_i + \frac{\omega}{q\mathcal{E}}\left\{p_i - (p_i^2 + M_0^2c^2)^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (4.50)$$

சமன் 4.33-லிருந்து $p^2 = \dfrac{E^2 - E_0^2}{c^2}$ ஆதலால்,

$$Cos\phi_f = Cos\phi_i + \frac{\omega}{q\mathcal{E}}\left\{\left(\frac{E_i^2 - E_0^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{E_i}{c}\right\}$$

அல்லது, $$Cos\phi_f = Cos\phi_i + \frac{\omega E_i}{cq\mathcal{E}}\left\{\left(1 - \frac{E_0^2}{E_i^2}\right)^{\frac{1}{2}} - 1\right\}$$

$$\therefore \quad Cos\phi_f = Cos\phi_i + \frac{\omega E_i}{cq\mathcal{E}}\left\{\left(1 - \frac{M_0^2c^4}{E^2_i}\right) - 1\right\} \quad (4.51)$$

சமன் 4.51-லிருந்து நேரியல் பொறியில் ஏற்றுக் கொள்ள உகந்த தொடக்கக் கலைக்கோண மதிப்புகளைத் தீர்மானிக்கலாம். மேலும் சமன் 4.51-ன் வலப்பக்க மதிப்பு ஒன்றைவிடக் குறைந்ததாக இருந்தால்தான், சமன் 4.51 பொருள் பொதிந்ததாக அமையும் என்பதை உணர வேண்டும்.

காட்டாக, அமெரிக்காவில் ஸ்டான்ஃபோர்டு பல்கலைக்கழகத்தில் உள்ள 1 *BeV* எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கியைக் கருதுவோம். இந்தப் பொறியிலுள்ள மின்புலம் 9.6 *MV/m* ஆகும். இம் மின்புலம் 2856 - மெகாஹெர்ட்ஸ் அதிர்வெண்ணோடு அலையும். இந்தப் பொறியினுள் 80 *keV* இயக்க ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரான்கள் செலுத்தப்படுகின்றன. இந்த மதிப்புகளைச் சமன் 4.51-ல் பதிலீடு செய்ய,

$$Cos\phi_f = Cos\phi_i - 1{\cdot}82 \quad (4.52)$$

என்றாகும். இந்தச் சமன்பாட்டின்படி $1 > Cos\phi_i > 0{\cdot}82$ ஆகும். எனவே, தொடக்கக் கலைக்கோண மதிப்புகள் $0° < \phi_i < 35°$ என்ற வரம்பில் அடங்கும். ஆகவே, இந்த மதிப்பிற்குள் அடங்கும் கலைக் கோணங்களுடன் நுழையும் எலெக்ட்ரான்கள்தான் தொடர்ந்து முடுக்கம் பெறும்.

4.16. எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கியில் குவிக்கும் விசைகள்

எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியிலும் ஆரத்திசையில் குவிதலகற்றும் விசைகள் உள்ளன.

லொரெண்ட்ஸின் சுருக்கத் (*Lorentz Contraction*) தத்துவப்படி அதிவேகமாக இயங்கும் நபர் ஒருவர் ஓய்வில் உள்ள பொருளைக் காண நேர்ந்தால்; அவர் இயங்கும் திசைக்கு இணையான திசையில்

பொருளின் நீளம் குறுகியும், இயங்கும் திசைக்கு நேர்குத்தான திசையில் அளவுகள் மாமுமலும் தோன்றும். இதன் பயனாக அதி வேகமாக இயங்கும் எலெக்ட்ரான்களுக்கு முடுக்கியின் நீளம் மிகச் சிறியதாகத் தோன்றும்.

எலெக்ட்ரான் ஒன்று பொறியின் அச்சினூடே dz என்ற தொலைவைக் கடக்கும்போது அத் தொலைவை dz' ஆக உணரும். லொரெண்ட்ஸ் சுருக்கத் தத்துவப்படி $dz' = \left(\sqrt{1-\beta^2}\right) dz$

$$\therefore \quad dz' = \frac{E_0}{E} \quad dz \qquad (4.53)$$

ஆனால், பொறியின் விட்டமோ எலக்ட்ரான் நோக்கில் ஒரு மாறிலியாகவே தோன்றும்,

பொறியினுள் இயங்கும்போது எலெக்ட்ரான் ஈட்டும் ஆற்றல் dE எனில் $dE \propto dz$

அல்லது, $dE = \alpha_1 dz \qquad (4.54)$

$$\therefore \quad dE = \frac{E}{E_0}\, \alpha_1 dz' \qquad (4.55)$$

சமன்கள் 4.54, 4.55-ஐத் தொகுநி காணில்

$$E - E_0 = \alpha_1 z$$

$$E_0 \ ln \left(\frac{E}{E_0}\right) = \alpha_1 z'$$

ஆகும்.

$$\therefore \quad z' = z \ \frac{E_0}{E - E_0} \ ln \left(\frac{E}{E_0}\right) \qquad (4.56)$$

சமன் 4.56-ன் படி z நீளமுள்ள முடுக்கி எலெக்ட்ரானுக்கு z' ஆகச் சுருங்கித் தோன்றுவது விளங்கும். எலெக்ட்ரான் அதிவேகமாக இயங்குகின்ற காரணத்தினுல் இவ்விதப் பண்பைப் பெறுகின்றது. என்பதைக் கவனத்தில் கொள்ளவேண்டும். இதனுல் நேரியல் முடுக்கியில் எலெக்ட்ரான்கள் இயங்கும்போது குவிதலகற்றும் விசைகளை (*Defocussing Forces*) உணரா.

காட்டாக, பிரான்சில் ஓர்சே (*Orsay*) என்னுமிடத்தில் உள்ள 2 *BeV* எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கி 180 மீட்டர் நீளம் உடையதாகும். பொறியினுள் இயங்கும் எலெக்ட்ரானுக்கு இந்தப் பொறி 0·374 மீட்டர் நீளமுடையதாகத் தோன்றும். ஸ்டான்ஃபோர்டிலுள்ள 3,000 மீட்டர் நீளமுடைய 45 *BeV* நேரியல் முடுக்கியினுள் இயங்கும்

எலெக்ட்ரானுக்கோ அதன் நீளம் 0·38 மீட்டராகத் தோன்றும். ஆகவே இத்தகு லொரெண்ட்ஸ் சுருக்கம் காரணமாகக் குவிதலகற்றும் விசைகள் வலுவற்றுப் போனதால் எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கியில் காந்த வில்லைகளைப் பயன்படுத்த வேண்டியதில்லை. எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கிக்கு மட்டுமே உரியதொரு சிறப்பியல்பு இதுவெனக் கூறலாம்.

4.17. குறிப்பிடத்தக்க எலெக்ட்ரான் நேரியல் முடுக்கிகள்

அமெரிக்காவில், இயங்கும் அலை எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறிகள், *W. W.* ஹன்சேன் (*W. W. Hansen*) மேற்பார்வையில் உருவாக்கப் பட்டன. 1947-ல் உருவாக்கப்பட்ட இத்தகைய நேரியல் பொறியில் 79 *keV* எலெக்ட்ரான்கள் செலுத்தப்பட்டன. இவை 6 *MeV* ஆற்றலுடன் வெளிவந்தன. பொறியின் மொத்த நீளம் 4·2612 மீட்டர் ஆகும். அலை வழிப்படுத்தியில் முதல் 0·9144 மீட்டருக்கு v_p/c-ன் மதிப்பு 0·5 முதல் 0·972 வரை இருக்கும்படி வட்டில்கள் அமைக்கப்பட்டன. மீதியுள்ள பகுதிகளில் v_p/c-ன் மதிப்பு 0·9823, 0·9906, 0·9967 என்றிருக்கும்படி அமைக்கப்பட்டது. இவ்வமைப்பு 1 *MW* திறனுடைய அலைவானுல் இயக்கப்பட்டது.

1949-ல் உருவாக்கப்பட்ட மார்க் *II* பொறி 40 *MeV* ஆற்றல் தரும்படி அமைக்கப்பட்டது. பொறி முழுவதுமே $\frac{v_p}{c} = 1$ ஆக இருக்குமாறு வட்டில்கள் அமைக்கப்பட்டன. 13 மெகாவாட் திறனுடைய மேக்னெட்ரான் அலைவானுல் இப்பொறி இயக்கப்பட்டது. இப்பொறியினுள் 80 *keV* ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரான்கள் செலுத்தப் பட்டன.

4.18. முடிவுரை

இதுகாறும் கண்டவற்றுல் புரோட்டான்களை முடுக்க அரை பீட்டா லாம்டா நேரியல் பொறி, பீட்டா லாம்டா நேரியல் பொறி என்னும் இருபொறிகள் செயல்படும் வகை குறித்தும், இரு பொறி களிலும் துகளின் ஆற்றல் ஈட்டம் அமையும் விதம் குறித்தும் அறிந்தோம். நேரியல் பொறியில் உள்ள நகர்வு குழாயின் நீளத்திற்கேற்ப ஆற்றல் மாறும் தன்மையையும் ஆராய்ந்தோம். குவிக்கும் விசை செயல்படவேண்டிய அவசியம் குறித்தும் கூறப்பட்டது. மின் னிறக்கத் தத்துவம், அயனியாக்கத் தத்துவம் முதலியன செயல்படும் அயனிவாய்களின் அமைப்பும் விவரிக்கப்பட்டது. புரோட்டான் நேரியல் பொறியில் இருந்து மாறுபட்டது எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறி என்றும், அலைவழிப் படுத்தியைப் பயன்படுத்தி எலெக்ட் ரான்கள் முடுக்கப்படும் என்பதும் விளக்கப்பட்டது.

லொரெண்ட்ஸ் சுருக்கம் காரணமாக எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியில் குவிக்கும் விசை தனிப்பண்புடையதாக அமைவதும் விளக்கப்பட்டது. புரோட்டான் நேரியல் பொறியில் உள்ளது போலவே, எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறியிலும் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவினால்தான் துகள்கள் உரிய ஆற்றலை அடைய முடியுமாதலால், அது குறித்தும் தெளிவு பெறப்பட்டது. நேரியல் முடுக்கியில் இயங்கி ஆற்றல் மிகுத்து வரும் துகள்கற்றை செறிவு மிக்கதாக இருப்பது இப் பொறியின் முக்கிய பண்பாகும். வட்டப் பொறிகளிலோ ஆற்றல் பெற்று வெளிவரும் துகள் கற்றையின் செறிவு குறைந்தும் பரந்தும் இருக்கும். பீட்டாட்ரான் போன்ற வட்டப் பொறிகளில் எலெக்ட்ரான் வட்டத் தடத்தில் இயங்கும். இவ்விதம் இயங்கும்போது கதிர்வீச்சின் காரணமாக அவை ஆற்றலை இழக்க நேரிடலாம். எனவே நேரியல் பொறிகளில் எலெக்ட்ரானை இயக்குவதன் மூலம் இத்தகு ஆற்றல் இழப்பைத் தவிர்க்கலாம்.

நேரியல் முடுக்கியிலிருந்து ஆற்றல் பெற்று வெளிவரும் கற்றைகளை இலக்கு ஒன்றின்மேல் மோதச் செய்து ஆய்வுகள் நிகழ்த்தும்போது கதிர் வீச்சுகள் தோன்றலாம். பொறியைத் தக்க முறையில் உறையிடுதல் மூலம், இத்தகு கதிர் வீச்சுகளிலிருந்து ஆய்வாளர்களைப் பாதுகாக்க வேண்டும். நேரியல் பொறிகளில் அவ்விதம் உறையிடுதல் எளிமையாக உள்ளது. இத்தகைய காரணங்களால் உயர் ஆற்றல் எல்லையில் எலெக்ட்ரானை முடுக்க நேரியல் முடுக்கியே உகந்ததாகும்.

ஆற்றல் மிகுந்த கற்றைகளை உருவாக்க வேண்டுமெனில் நேரியல் முடுக்கியின் நீளத்தை அதிகரிக்க வேண்டும். நகர்வு குழாய்களின் எண்ணிக்கையை அதிகமாக்குவதன் மூலம் *BeV* ஆற்றல்வரை துகள்களை இப் பொறிகளில் முடுக்கலாம். அதற்காகும் செலவும் குறைவுதான். அதற்கும் மேற்பட்ட உயர்ந்த ஆற்றல் எல்லைகளில் நேரியல் பொறிகளின் நீளம் மிக நீண்டதாக அமைந்துவிடும். இத்தகைய நீளம் மிகுந்த பொறிக்கேற்ற உயர்மின் புலங்களை அமைப்பது எளிதன்று. இதற்குத் திறன்மிக்க ரேடியோ அதிர்வெண் தோற்றுவாய்கள் தேவைப்படும். இத்தகைய இடையூறுகளை விலக்க எண்ணிய அறிவியலாளர்களின் சிந்தனையில் மலர்ந்தவையே வட்டப் பொறிகளாகும்.

5. கனவு தந்த பொறிகள்

5.1. முன்னுரை

நேரியல் ஒத்திசைவு முடுக்கிகளையொட்டி வளர்ந்த முயற்சிகள் ஆற்றல் முடுக்கிகளின் வரலாற்றில் பெரும் மாற்றங்களை உருவாக்கின. நேரியல் முடுக்கியில் முடுக்கம் பெறும் துகள் நேர்கோட்டுப் பாதையில் இயங்கும் எனவும், துகள்களின் ஆற்றல் அதிகரிக்க வேண்டுமெனில் பொறியின் நீளமும் அதிகரிக்கப்பட வேண்டும் எனவும் முன் அத்தியாயத்தில் கண்டோம். இத்தகு நீளம் மிகுந்த அமைப்புடைய பொறிகளை அமைப்பதினால் தோன்றும் இடையூறுகளை விலக்க முயன்ற இயற்பியல் அறிஞர்களுள் லாரென்ஸ் (Lawrence) என்பவர் மிகச் சிறந்த பணி செய்தார். நேர்கோட்டுப் பாதையில் இயங்குவதற்குப் பதிலாகத் துகள்களை வட்டப்பாதையில் இயங்க வைத்து ஆற்றல் பெருக்க முடியுமோ என்ற கனவின் அடிப்படையில் மலர்ந்த துகள் முடுக்கும் பொறி சைக்ளோட்ரான் ஆகும்.

அவர் கருத்து செயல்பட்டுப் பிறந்து ஒளிர்ந்த இந்தப் பொறியில், துகளை முடுக்குகின்ற ரேடியோ அதிர்வெண் மின்புலமும், வழிப்படுத்துகின்ற காந்தப்புலமும் செயல்படுகின்றன. தடத்தில் இயங்குகின்ற துகளின் தடச் சுற்று அதிர்வெண்ணுக்கும் (*Orbital Revolution Frequency*), அத் துகளை முடுக்குவிக்கும் அலையும் மின்புலத்திற்கும் (*Oscillating Electric Field*) இடையே ஒத்திசைவை (*Resonance*) உருவாக்கலாம். இந்த ஒத்திசைவினால் சைக்ளோட்ரான் செயல்படுவதால், இப் பொறி காந்த ஒத்திசைவு முடுக்கி (*Magnetic Resonance Accelerator*) எனப்படும்.

இத்தகு காந்த ஒத்திசைவு தத்துவம் நிறைவேற்றப்பட்டுச் சுருள் பாதையில் துகள்கள் இயங்குவதால், அடுத்தடுத்த தடங்களுக்கு இடையேயான தூரத்தைக் கணிக்க வேண்டியுள்ளது. ஆற்றல் மிகுத்துக்கொண்டே வரும் துகள்களை, விலக்கியை அமைத்துப் பொறியிலிருந்து வெளியேற்ற இது துணை செய்யும்.

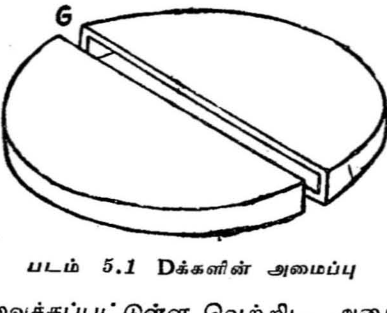
சைக்ளோட்ரானுள் ஆற்றல்பெற அணுகும் துகள்கள் யாவுமே ஒரே அளவு ஆற்றல் ஏற்பன அல்ல. எனவே, எல்லாத் துகள்களும் சீரான ஆற்றல் பெறக் கலைக்கோண நிலைப்பாடு பெற வேண்டும். ஆதலால், பொறியுள் இயக்கத்திற்கு உகந்த - ஏற்கத் தகுந்த கலைக்கோண நெடுக்கம் (*Acceptable Phase*) நிறுவப்படும்.

துகளின் இறுதி ஆற்றலானது, காந்தப்புல மதிப்பு B-ஐயும் தடஆரம் r-ஐயும் எவ்விதத்தில் சார்ந்துள்ளது என்பதையும் ஆராய வேண்டும். வழிப்படுத்தும் காந்தப்புலத்தின் அமைப்பு புலஎண் என்னும் பயனுறு கருத்தால் நிறுவப்படும். தக்க ஆற்றல் அடைந்த துகள்களைப் பொறியினின்று மீட்டு, இலக்கின்மேல் மோதச்செய்து ஆய்வுகள் நிகழ்த்துவதற்கான வாய்ப்பும் கூறப்படும்.

சைக்ளோட்ரான் பொறியின் உதவினால், புரோட்டான், ஆல்ஃபாத்துகள் முதலிய நேர்மின்னூட்டத் துகள்களை முடுக்கலாம். எனினும், நிறை குறைந்த எதிர் மின்னூட்டத் துகளாகிய எலெக்ட்ரானை முடுக்கம் பெறுமாறு செய்ய முடியவில்லை. இதற்குக் காரணம் சார்பியல் கொள்கையைச் சார்ந்ததென அறிவோம். இருப்பினும், இந்த அடிப்படைத் துகளை முடுக்கும் முயற்சியில் மனிதன் ஓயவில்லை, இவ் வகையில் மைக்ரோட்ரான் (*Microtron*) என்ற எலெக்ட்ரான் சைக்ளோட்ரான் (*Electron Cyclotron*) பொறி உருவாக்கப்பட்டது என்பதையும் காண்போம்.

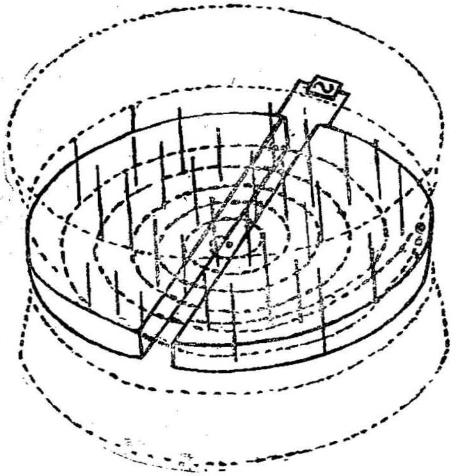
5.2 சைக்ளோட்ரானின் அமைப்பும் இயக்கமும்

இப் பொறியில் தட்டையான உருளைவடிவ வெற்றிட அறையில் அமைந்த இரு உள்ளீடற்ற மின்முனைகளுக்குள்ளே துகள்கள் சுழலுகின்றன. மின்முனைகளின் அமைப்பைப் படம் 5.1 – ல் காணலாம். அவற்றின் வடிவம் காரணமாக அவற்றை Dக்கள் (*Dees*) என்றே கூறுகிறோம். Dக்களுக்கு இடையில் ரேடியோ அதிர்வெண் (*Radio Frequency*) கொண்ட மின்னழுத்தம் செயல்படுகின்றது. இதனால், அவ்விரு Dக்களுக்கும் இடையே உள்ள வெளியில் (*Gap* - G) முடுக்குகின்ற மாறு மின்புலம் (*Accelerating Electric Field*) தோன்றலாகும். ஆனால் Dக்களுக்கு உள்ளே மின்புல மெதுவும் செயற்படாது. Dக்கள் வைக்கப்பட்டுள்ள வெற்றிட அறை பித்தளை வளையத்தால் ஆனது. அதன் அடிப்பாகம் தடிப்பான இரும்புத் தகட்டால் ஆனது. அந்தத் தகடு பித்தளை வளையத்தோடு இறுக்கமாகப் பிணைக்கப்பட்டிருக்கும். மேல்பாகம் மற்றொரு இரும்புத் தகட்டால் ரப்பர் வளையத்தோடு இறுக்கமாக மூடப்பட்டிருக்கும். இம் மூடியைத் தேவையானபோது



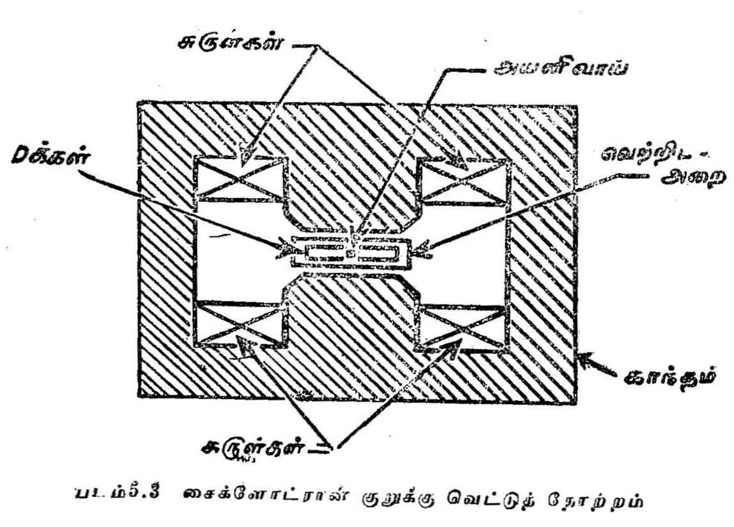
படம் 5.1 Dக்களின் அமைப்பு

திறந்து கொள்ளலாம். Dக்களின் நிலையைச் சரிபார்க்க உதவும் காட்சிச் சாளரங்களும் இந்தப் பித்தளை வளையத்தில் உள்ளன. வெற்றிட அறை வட்ட வடிவமாக இருப்பதைவிடச் செவ்வக வடிவமாக இருப்பது பொறியின் அமைப்புக்கு உகந்ததாகும். இவ் வெற்றிட அறையானது பெரியதொரு காந்தத்தின் இரண்டு துருவங்களுக்குமிடையில் வைக்கப்பட்டுள்ளதால், Dக்களுக்கு நேர்க் குத்தாகக் காந்தப்புலமொன்று செயல்படுகின்றது. காந்தத் துருவங் களையும் அவற்றிற்கு இடையிலுள்ள Dக்களின் நிலையையும் படம் 5.2 - ல் காணலாம்.

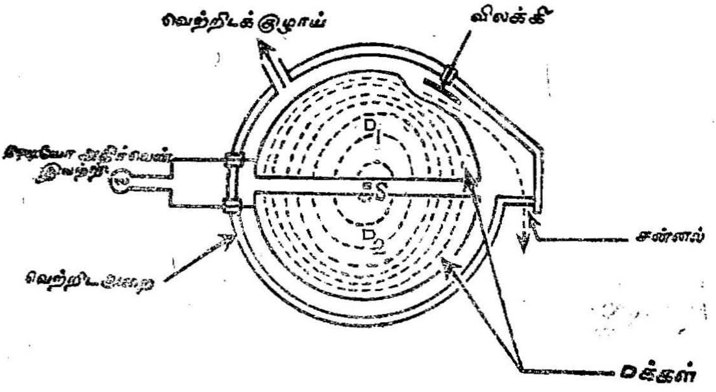


படம் 5.2 காந்தங்களுக்கு இடையே Dக்கள்

வெற்றிட அறையின் மையத்தில் S-என்ற அயனி-வாய் ஒன்று உள்ளது. அயனிவாயிலிருந்து குறைந்த வேகத்துடன் நேர் மின்னூட்டமுடைய அயனிகள் வெளிவருகின்றன(படம்5.4). இவை இடைவெளி G - ல் முடுக்கம் பெற்று எந்த மின்முனை எதிர்மின்னூட்டம் பெறுகின்றதோ அதனை நாடும். உதாரமாக D_1 எதிர் மின்னூட்டமுடையதாகக் கருதுவோம். எனவே அயனிகள் D_1 –ல் நுழையும். அங்குக் காந்தப் புலம்



படம்5.3 சைக்ளோட்ரான் குறுக்கு வெட்டுத் தோற்றம்



படம் 5.4 சைக்ளோட்ரானின் வெற்றிட அறை

மட்டுமே செயல்படுவதால், அதனுள் நுழைந்த அயனிகள் மாறாத வேகத்துடன் அரைவட்டத்தடத்தில் இயங்கும். இவை மீண்டும் இடைவெளி G - ஐ அடையும் தருணத்தில், முடுக்கும் மின்புலம் தன் திசையை மாற்றிக் கொள்ளும். எனவே D_2 எதிர் மின்னூட்டம் பெறலாகும். இதன் பயனாக, துகள்கள் இடைவெளியில் முடுக்கம் பெற்றபின், D_2 –ல் நுழையும். D_1 - ல் இயங்கியதைப் போலவே இந்தத் துகள்கள் D_2 — லும் ஓர் அரைவட்டப் பாதையில் இயங்கும். ஆனால், இந்த அரைவட்டப் பாதையின் ஆரம் முன்னர் இருந்ததைக் காட்டிலும் சிறிது அதிகரித்திருக்கும். மீண்டும் இடைவெளியை நாடி முடுக்கம் பெறும் துகள்கள், இப்பொழுது D_1 எதிர்மின்னூட்டம் பெற்றுள்ளதால் அதனுள் நுழையும். மேற்கூறியவாறு முடுக்குகின்ற மின்புலமும் வழிப்படுத்தும் காந்தப்புலமும் இணைந்து செயல்பட்டு விளைந்த துகளின் பாதை சுருள்வடிவமாக அமைகின்றது (படம் 5.4).

துகளின் திசைவேகம் அதிகரித்துக் கொண்டே வருவதாலும் அதன் நிலைமப்பண்பினாலும், அது இயங்கும் பாதையின் வளைவு ஆரம் பெருகுகின்றது. ஆரம் பெரிதாகப் பெரிதாகத் துகளியங்கும் பாதையின் நீளமும் அதிகரிக்கின்றது. இதே நேரத்தில் துகள் முடுக்கி விடப்படுவதால் அதன் திசைவேகமும் உயருகின்றது. ஆகவே ஒரு முழுச்சுற்றை முடிப்பதற்குத் துகள் எடுத்துக்கொள்ளும் நேரம் எப்பொழுதும் மாறாமலே இருக்கும். அதாவது துகளியங்கும் சுற்றுப் பாதையின் நீளம் அதிகரிக்கப்படுவதால் தோன்றவேண்டிய மாறுதல்கள் துகளின் வேகம் அதிகரிப்பதால் ஈடுசெய்யப்படுகின்றன.

ஒவ்வொரு சுற்று முடியும் போதும் துகள்களின் ஆற்றல் அதிகரித்துக்கொண்டே வந்து, காந்தப்புல எல்லையை அடையும் போது ஆற்றல் மிக்கதொரு கற்றையாக வெளிவருகின்றது.

5.3. காந்த ஒத்திசைவும் அலைவுநேரமும் (Magnetic Resonance and Period)

சைக்ளோட்ரானில் துகள்கள் முடுக்கம்பெற வேண்டுமெனில் காந்த ஒத்திசைவு உருவாக்கப்படவேண்டும் எனக் கண்டோம். *D*-ஐ விட்டுத் துகள் இடைவெளியை நாடும் தருணத்தில், மின்புலம் தன் திசையை மாற்றிக் கொள்ள வேண்டும் எனவும் கண்டோம். இவை இரண்டும் நிறைவேறத் தேவையான சூழ்நிலையைப் பற்றி இனிக் காண்போம்.

ஒத்திசைவு நிகழ வேண்டுமெனில் *D*-க்குள்ளே அரைவட்டப் பாதையில் துகள் இயங்கத் தேவைப்படும் நேரமும், அலைவானின் அரை அலைவு நேரமும் (*Half Period*) சமமாக வேண்டும். மேலும், ஒவ்வொரு முறையும் இடைவெளியை அணுகும்போது, அதே கலைக் கோணத்தில் மின்புலத்தைச் சந்தித்தால்தான், துகள் ஆற்றலை ஈட்ட முடியும்.

துகளின் மின்னூட்டம் q எனவும், அத் துகள் r ஆரமுள்ள வட்டத்தடத்தில் இயங்கும்போது வேகம் v எனவும் கொள்வோம். துகளின் நிறை M எனவும், துகள்மீது செயல்படும் காந்தப்புலம் B எனவும் கொள்வோம். இதில் $M \approx$ ஓய்வு நிறை M_0 ஆகும். காந்தப் புலத்தால் துகள்மீது செயற்படும் விசை Bqv ஆனது, மைய நோக்கு விசை $\frac{Mv^2}{r}$ க்குச் சமம். இதன் பயனாகத்தான் துகள் வட்டப் பாதையில் இயங்குகின்றது.

$$\therefore \frac{Mv^2}{r} = Bqv \qquad (5.1)$$

அல்லது,

$$Mv = Bqr \qquad (5.2)$$

ஆகும். காந்தப்புலம் B மாறிலியாக இருக்குமாயின், உந்தம் அதிகரிக்க அதிகரிக்க வட்டத்தடத்தின் வளைவு ஆரம் r அதிகரிக்கும் என்பதைச் சமன் 5.2-லிருந்து அறியலாம். ஆகவே சைக்ளோட்ரானில் துகளின் தடம் சுருள் வடிவமாக அமைகின்றது. மேலும் துகளின் உந்தத்தை அதிகரிக்க வேண்டுமெனில், அதற்கேற்ப அமையும் தடம் காந்தப்புல எல்லைக்குள் அடங்க வேண்டும் என்பதை நினைவில் கொள்ள வேண்டும். ஆகவே, உந்த மதிப்பை அதிகமாக்க வேண்டுமெனில் காந்தத்தின் விட்டத்தையும் அதிகமாக்க வேண்டும்.

சமன் 5.2 லிருந்து துகளின் வேகத்திற்குரிய கோவை

$$v = \frac{Bqr}{M} \tag{5.3}$$

ஆகும். துகளானது ஒரு சுற்றை முடிக்கத் தேவைப்படும் நேரம் τ எனில்,

$$\tau = \frac{2\pi r}{v} \tag{5.4}$$

அல்லது,

$$\tau = \frac{2\pi M}{Bq} \tag{5.5}$$

ஆகும். எனவே, *D*யினுள் துகள் அரைவட்டப் பாதையில் இயங்கத் தேவைப்படும் நேரம்

$$\tau_1 = \frac{\tau}{2} = \frac{\pi M}{Bq} \tag{5.6}$$

சமன் 5.6-லிருந்து *M*, *B*, *q* ஆகியவற்றின் குறிப்பிட்ட மதிப்புகளுக்கு τ_1 ஒரு மாறிலியென அறியலாம். ரேடியோ அதிர்வெண் மின்னழுத்த இயற்றியைச் (*Generator*) சீரமைப்பதன் மூலம் அலைவுப்புலத்தின் அரை அலைவு நேரத்தை (*Half Period*) இந்த τ_1 க்குச் சமமாக்கலாம். இவ்விதம் இரண்டு நேரங்களும் சமமானுல் ஒத்திசைவு நிலவும். இதனுல், துகள்கள் இடைவெளி **G**-ல் மின்புலத்தை அதே கலைக்கோணத்தில் சந்திக்கும். ஆகவே, ஒவ்வொரு முறை இடைவெளியை நாடும் போதும் துகள்கள் அதே அளவு ஆற்றலை ஈட்டும்.

மின்புலத்தின் அரை அலைவு நேரமானது τ_1 க்குச் சமமாக அமையும் போது, ரேடியோ அதிர்வெண் இயற்றியின் கோண அதிர்வெண் ω_{rf} எனில்,

$$\tau_1 = \frac{\pi}{\omega_{rf}}$$

ஆகும்.

$$\therefore \omega_{rf} = \frac{Bq}{M} \tag{5.7}$$

காந்த ஒத்திசைவு நிகழச் சமன் 5.7 நிறைவேற வேண்டும். மேலும் சமன் 5.7 லிருந்து துகளின் நிறைக்கேற்ப ω_{rf} மாற்றப்படவேண்டும் என்றறியலாம். முதுபழங் கொள்கைப்படி குறைந்த வேகத்தில் துகளியங்கும் வரை துகளின் நிறையில் மாற்றம் ஏற்படாது. எனவே, அவ் வேகங்களில் மட்டுமே சமன் 5.7 நிறைவு பெறும். துகளின் வேகம் ஒளியின் வேகத்தை நெருங்கும்போது மேற்கண்ட தொடர்பு பொருந்தாது.

காந்தப்புலத்தின் மதிப்பை மாற்றுவதன் மூலமோ அல்லது அலைவானின் அரை அலைவு நேரம், τ_1 க்குச் சமமாகுமாறு செய்வதன்

மூலமோ சமன் 5.7-ஐ நிறைவு பெறச் செய்யலாம். ஒத்திசைவு உருவாக்கப்பட்ட பின்னர் அலைவானின் கோண அதிர்வெண் ω_{rf} ஒரு மாறிலியாகும். இதனால் சைக்ளோட்ரான் நிலை அதிர்வெண் சைக்ளோட்ரான் *(Fixed Frequency Cyclotron)* எனப்படும்.

5.4. அடுத்தடுத்த தடங்களுக்கிடையே உள்ள தூரம்

சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகளின் பாதை சுருள் வடிவில் அமையும் எனக் கண்டோம். இனி, அவ்வாறு அமைந்த பாதையில் அடுத்தடுத்த தடங்களுக்கிடையேயான தூரத்தைக் கணக்கிடுவோம்.

சமன் 5.2-லிருந்து, $$Br = \frac{Mv}{q}$$

$$= \frac{E\beta c}{qc^2} \quad \left[\therefore \beta = \frac{v}{c}\right]$$

ஆனால், சமன் 2.11-லிருந்து $$\beta = \left(\frac{E^2 - E_0^2}{E^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

எனவே, $$Br = \frac{E}{qc}\left(\frac{E^2 - E_0^2}{E^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.8)$$

அல்லது, $$Br = \frac{1}{cq}\,(E^2 - E_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.9)$$

ஆனால், $$E^2 - E_0^2 = (E_0 + T)^2 - E_0^2$$

$$= T^2 + 2TE_0$$

ஆதலால், சமன் 5.9-லிருந்து $$Bqrc = (T^2 + 2T\,E_0)^{\frac{1}{2}} \quad (5.10)$$

என்று பெறலாம். எனவே சமன் 5.10—லிருந்து,

$$\ln B + \ln qc + \ln r = \tfrac{1}{2}\ln(T^2 + 2TE_0) \quad (5.11)$$

பகுதி காணில், $$\frac{dB}{B} + \frac{dr}{r} = \frac{T + E_0}{T^2 + 2TE_0}\,dT \quad (5.12)$$

$$\therefore \frac{dr}{r} = \left(\frac{(T + E_0)}{T^2 + 2TE_0}\right)dT - \frac{dB}{B} \quad (5.13)$$

புல எண் $$n = -\frac{dB/B}{dr/r}$$

ஆதலால்,
$$\frac{dr}{r} = \frac{(T+E_0)}{(T^2+2TE_0)}\, dT + n\,\frac{dr}{r}$$

எனவே,
$$\frac{dr}{r} = \frac{(T+E_0)}{(T^2+2TE_0)\ (1-n)}\, dT \quad (5.14)$$

ஆகும்.

சமன் 5.14-ல் dT என்பது ஒரு சுற்றில் துகள் ஈட்டும் ஆற்றலெனில், dr அடுத்தடுத்த இரு தடங்களுக்கிடையேயுள்ள தூரம் ஆகும்.

துகள் Dக்களுக்கு இடையே உள்ள வெளியைக் கடக்கும்போது மின்னழுத்தக் கலைக்கோணம் ϕ எனவும், மின்னழுத்தப் பெரும மதிப்பு V_m எனவும் கருதுவோம். எனவே, துகள் மின்புலத்தை ஒருமுறை நாடி ஈட்டும் ஆற்றல் $qV_m\ Sin\,\phi$ ஆகும். ஒரு சுற்றில் துகளானது இருமுறை மின்புலத்தை நாடுவதால் அது ஈட்டும் ஆற்றல் '$2qV_m\ Sin\phi$' ஆகும். எனவே,

$$dT = 2qV_m\ Sin\phi \quad (5.15)$$

E_0-உடன் ஒப்பிடுகையில் T மிகச் சிறியதாக இருப்பதால் சமன் 5.14-ஐப் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\frac{dr}{r} \approx \frac{E_0}{2TE_0(1-n)}\, dT$$

$$\approx \frac{dT}{2T(1-n)} \quad (5.16)$$

சமன் 5.15-ஐப் 5.16-ல் பதிலீடு செய்ய

$$\frac{dr}{r} = \frac{2q\ V_m\ Sin\phi}{2\ T\ (1-n)}$$

அல்லது,
$$\frac{dr}{r} = \frac{q\ V_m\ Sin\phi}{T\ (1-n)} \quad (5.17)$$

ஆகும். சமன் 5.17-லிருந்து அடுத்தடுத்த இரு தடங்களுக்கிடையேயான தூரத்தை மதிப்பிடலாம்.

துகள் கற்றையானது Dக்களுக்கு இடையே உள்ள வெளியில் முடுக்கம் பெறும்போது $\phi = \pi/2$ எனில், சுற்றுகளுக்கிடையே உள்ள தூரம் dr பெரும மதிப்பைப் பெறும். இந் நிலையில் விலக்கிமீது மோதாமல் துகள்கற்றையை வெளியேற்றுதல் எளிதாகும். dr பெரும மதிப்பைப் பெறுமானல் துகள்கற்றையின் அடர்த்தியும் குறையும்.

8

5.5. சைக்ளோட்ரானில் கலைக்கோண நெடுக்கம் (Range of Phase in Cyclotron)

துகளொன்றின் கலைக்கோணம் எவ்விதம் அமைகின்றது என்பதை ஆராய்வோம். துகளின் திசைக் கோணத்தை *(Azimuthal Angle)* θ எனக் குறிப்போம். இந்தத் திசைக்கோணம் இடைவெளியின் மையத்திலிருந்து அளக்கப்படுகிறது. ϕ-க்கும் θக்கும் உள்ள தொடர்பை

$$\phi = \omega_{rf}t - \theta \qquad (5.18)$$

என எழுதலாம். பகுதி காணில்,

$$\dot{\phi} = \omega_{rf} - \dot{\theta} \qquad (5.19)$$

என்றாகும்.

அல்லது,
$$\dot{\phi} = \omega_{rf} - \omega \qquad (5.20)$$

ஆனால்,
$$\omega = \frac{c^2qB}{E}$$

ஆதலால்,
$$\dot{\phi} = \omega_{rf} - \frac{c^2qB}{E} \qquad (5.21)$$

சமன் 5.21 - லிருந்து நிலைத்த அதிர்வெண் சைக்ளோட்ரானில் ϕ- ன் மதிப்புகளைப் பெறலாம். நிலைத்த அதிர்வெண் சைக்ளோட்ரானில் ω_{rf} ஒரு மாறிலியாதலால், எந்தவொரு இசைவுறு துகளுக்கும் உரிய கலைக்கோணம் ϕ- மாறிலியென்று நிறுவலாம்.

இனி, காந்தப்புலம் மாறிலியாக உள்ளதாகக் கருதுவோம். இப்பொழுது, தடத்தில் இயங்கும் துகளின் ஆற்றல் அதிகரித்துக் கொண்டே வருவதால் ϕ - ன் மதிப்பும் மாறுபட்டுக் கொண்டே வரும். ஆகவே, துகளின் ஆற்றல் உயர உயர ϕ - மதிப்பும் மாறுபடும் என்றறியலாம். ϕ - ன் மதிப்புகள் முதலில் குறையத் தொடங்கி, $\dot{\phi}$ சுழியமாகும்போது சிறும மதிப்பை *(Minimum Value)* அடைந்து, மீண்டும் அதிகரிக்கும். ϕ - ன் மதிப்பில் ஏற்படும் இத்தகைய மாறுபாடு மிகச் சிறியது என விலக்கிவிட முடியாது. ϕ-ன் மதிப்புகளின் நெடுக்கம், ஏற்கத் தகுந்ததாக அமையுமாறு பொறியின் அளபுருபுகளை அமைக்க வேண்டும்.

அடுத்து, கலைக்கோண மாறுபாடுகளை ஆராய்வோம். இதற்குத் துகளின் பாதைமுழுவதும் காந்தப்புலம் சீராகப் பரவியிருப்பதாகவும், முடுக்கந்தரும் இடைவெளி மிகச்சிறியது எனவும், கலைக்கோண மாறுபாடு தொடர்ச்சியாக நிகழ்வதாகவும் கருதுவோம். மேலும் ஒரு சுற்றில் ஏற்படும் கலைக்கோணப் பெயர்ச்சியை *(Phase Shift)* நேரியல் தொடர்பால் *(Linear Relation)* குறிக்க முடியுமெனக் கொள்வோம்.

ஒரு சுற்றில் ஏற்படும் கலைக்கோணப் பெயர்ச்சியை நேரியல் தொடர்பால் குறிக்க, $\Delta\phi \approx \dot{\phi} \; \frac{\pi}{\omega}$ (5.22)

ஆகும்.

அல்லது, $$\Delta\phi = \frac{\pi(\omega_{rf} - \omega)}{\omega}$$

$$\therefore \quad \Delta\phi = \pi\left(\frac{\omega_{rf}}{\omega} - 1\right)$$

எனவே, $$\Delta\phi = \pi\left(\frac{\omega_{rf}\, E}{c^2 q\, B} - 1\right) \qquad (5.23)$$

ஆகும்.

இனி, $$\frac{d\phi}{dE} \approx \frac{\Delta\phi}{\Delta T}$$

எனக் கொள்வோம்.

ஒருமுறை இடைவெளியைக் கடக்கும் போது துகள் ஈட்டும் ஆற்றல் ΔT எனக் குறிப்போம். எனவே $\Delta T = qV_m \, Sin\phi$ எனலாம்.

$$\therefore \frac{d\phi}{dE} = \frac{\pi}{qV_m Sin\phi}\left(\frac{\omega_{rf}E}{c^2qB} - 1\right) \qquad (5.24)$$

$$\therefore Sin\phi \; d\phi = \frac{\pi}{qV_m}\left(\frac{\omega_{rf}E}{c^2qB} - I\right) dE$$

$$\because \; d(Cos\phi) = -\frac{\pi}{qV_m}\left(\frac{\omega_{rf}E}{c^2qB} - 1\right) dE \qquad (5.25)$$

ஆகும்.

துகள் உட்செலுத்தப்படும் போது ஒய்வில் இருப்பதாகக் கொள்வோம். இந்த ஒய்வு நிலைக்குரிய ஆற்றல் E_0 எனவும், கலைக் கோணம் ϕ_o எனவும், முடுக்கமடைந்த துகளின் ஆற்றல் E எனவும் கொண்டு, சமன் 5.25 ஐ தொகுநி காணில்

$$\int_{\phi_o}^{\phi} d(Cos\phi) = \frac{-\pi}{qV_m}\int_{E_o}^{E} \left(\frac{\omega_{rf}E}{c^2qB} - 1\right) dE \qquad (5.26)$$

$$\Big(Cos\phi\Big)_{\phi_o}^{\phi} = \frac{-\pi}{qV_m}\left\{\frac{\omega_{rf}}{c^2qB}\left(\frac{E^2}{2}\right)_{E_o}^{E} - \Big(E\Big)_{E_o}^{E}\right\} \qquad (5.27)$$

$$\therefore \; (Cos\phi - Cos\phi_0) = -\frac{\pi}{qV_m}\left\{\frac{\omega_{rf}}{2c^2qB}(E^2 - E^2{}_o) - (E - E_o)\right\} \qquad (5.28)$$

$$(Cos\phi - Cos\phi_0) = -\frac{\pi}{qV_m}\left\{\frac{\omega_{rf}}{2c^2qB}(E-E_0)(E+E_0)-(E-E_0)\right\}$$

$$= -\frac{\pi}{qV_m}\left\{\frac{\omega_{rf}}{2c^2qB}\; T(T+2E_0)-T\right\}$$

$$= -\frac{\pi\,\omega_{rf}\,T^2}{2qV_mc^2qB}+\frac{\pi T}{qV_m}-\frac{\pi\omega_{rf}\;2TE_0}{2qV_mc^2qB}$$

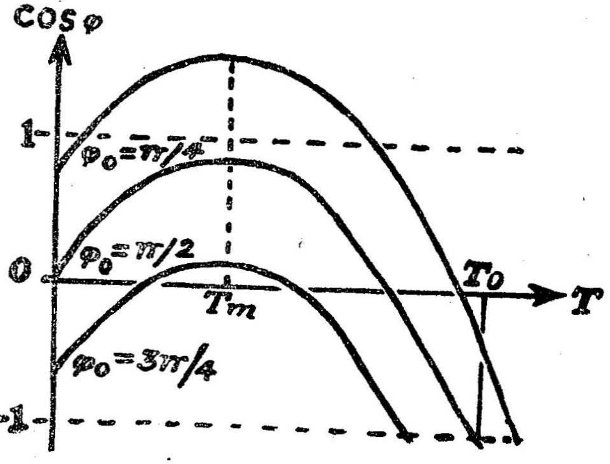
$\frac{c^2qB}{E_0}$ என்பது சார்பியல் சாராத காந்த ஒத்திசைவு அதிர்வெண் (*Non-Relativistic Magnetic Resonant Frequency*) எனப்படும். $\frac{c^2qB}{E_0}$ - ஐ, ω_0 எனக் குறிப்போமானால்,

$$Cos\phi = Cos\phi_0 - \frac{\pi\,\omega_{rf}\;T^2}{2qV_mE_0\omega_0}+\frac{\pi T}{qV_m}-\frac{\pi T\omega_{rf}}{qV_m\omega_0}$$

அல்லது, $Cos\phi = Cos\phi_0 + \frac{\pi T}{qV_m}\left(1-\frac{\omega_{rf}}{\omega_0}\right)-\frac{\pi\omega_{rf}\;T^2}{2qV_mE_0\omega_0}$ (5.29)

ஆகும்.

பொறியின் குறிப்பிட்ட அளபுருபுகளுக்கு ஏற்றவாறு இயக்க ஆற்றல் T-க்கும் $Cos\phi$-க்கும் இடையே வரைபடம் வரையலாம். சமன் 5.29-ன் படி, ϕ_0 ன் வெவ்வேறு மதிப்புகளுக் கேற்ப, $Cos\phi$-க்கும் T-க்கும் இடையில் வரையப்பட்ட வரைகோடு களைப் படம் 5.5-ல் காணலாம்.



படம் 5.5 $Cos\phi - T$ படம்

இவ் வரைபடத்திலிருந்து ϕ_0-ன் மதிப்புகளையும் ϕ-ன் மதிப்பு களையும் பெறலாம்,

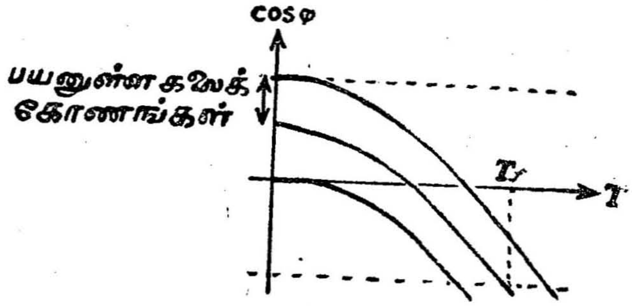
சமன் 5.29-ல் உள்ள $Cos\phi$-ன் மதிப்பு எதுவும் 1-ஐ விட அதிகமாக முடியாது. எனவே, இவ் வரைபடத்திலிருந்து சில பண்புகளை ஆராய்வோம். வரைபடத்தில் $T>0$ வாக உள்ள பகுதிகளே பொருள் உள்ளவை ஆகும். $T>0$ வாக அமையும் பகுதியிலும், $Cos\phi_0$-ன் குறிப்பிட்ட சில மதிப்புகளுக்கு ($Cos\phi_0 <1$) ஏற்ப அமையும் T-யின் மதிப்புகள், $Cos\phi$-ன் மதிப்பை 1-ஐ விட அதிகமாக்கக் கூடும். இவ்விதம் $Cos\phi$ ஒன்றைவிட அதிகமானால் பொருளற்றது என்பது தெளிவு. T-யின் மதிப்பு மிக அதிகமாக இருக்கும்போது, $Cos\phi_0$-ன் எந்த மதிப்புக்கும் இவ்வித நிலை உருவாகலாம். $Cos\phi\approx1$ எனில் $Sin\phi=0$ ஆகும். எனவே, துகள் ஈட்டும் ஆற்றல் $\Delta T=0$ ஆகும். இந்நிலையில் சமன் (5.24) நிறைவு பெற முடியாது. மேலும், ϕ_0-ன் சில குறிப்பிட்ட மதிப்புகளுக்கு துகளின் இறுதி ஆற்றல் T_f ஆனது, வரம்பு மதிப்பு (*Limiting value*) ஆற்றல் T_0-ஐ மிஞ்ச முடியாது. இந்நிலை உருவாகுமானால், சமன் 5.29-ல் $Cos\phi$-ன் மதிப்பு -1-ஐ விடக் குறைந்துவிடும். மேற்சொன்ன காரணங்களால் $Cos\phi>1$ ஆக்கக்கூடிய இறுதி ஆற்றல்மதிப்பு நடைமுறையில் பெறக்கூடியது அன்று என அறியலாம். மேலும் பொறியில் இயங்கும் துகள், சீரான ஆற்றல் பெற்று இறுதி ஆற்றலை அடைய $Cos\phi$-ன் மதிப்புகள் $+1$ க்கும் -1 க்கும் இடையில்தான் இருக்கவேண்டும் எனவும் அறியலாம். $Cos\phi$-க்கு இவ்வித மதிப்புகளை அளிக்கவல்ல ϕ_0 மதிப்புகளே உகந்தவை. தொடக்க கலைக் கோணம் ϕ_0-ன் இம் மதிப்புகளே ஏற்கத் தகுந்த (*Acceptable*) கலைக்கோண மதிப்புகள் எனப்படும்.

அயனிவாயிலிருந்து அயனிகள் தொடர்ச்சியாக வெளிவருமாதலால், அவற்றின் தொடக்க கலைக்கோணம் (ϕ_0) எல்லா மதிப்புகளையும் பெற்றிருக்கும். ஆனால், 'ஏற்கத் தகுந்த' கலைக்கோணம் உடைய அயனிகளே முடுக்கம் பெற உகந்தவை. ϕ_0-ன் இந்த ஏற்கத் தகுந்த மதிப்புகள் பரந்து இருக்குமாறு செய்ய, பொறியின் அளபுருபுகளைச் சீரமைக்கலாம். அப்பொழுதுதான் பெரும்பாலான அயனிகள் பொறியுள் இயங்கி முடுக்கம் பெறுதல் இயலும்.

இனி, $\omega_{rf} = \omega_0$ எனில்,

$$Cos\phi = Cos\,\phi_0 - \frac{\pi T^2}{2qV_mE_0} \qquad (5.30)$$

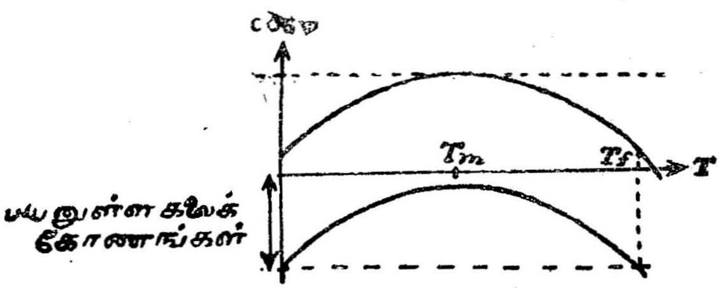
என எழுதலாம். எனவே, இப்பொழுது $Cos\phi$-க்கும் T-க்கும் இடையில் வரைபடம் வரைந்தால், படம் 5.6-ல் உள்ளவாறு வரை



படம் 5.6 $Cos\phi - T$ படம்

கோடுகள் அமையும். இந்த வரைபடத்திலிருந்து தொடக்க கலைக்கோணம் ϕ_0-ன் குறிப்பிட்டதொரு மதிப்புக்கு ஆற்றலின் வரம்பு மதிப்பு (*Limiting value*) T_0 ஆனது குறைந்திருப்பது புலப்படும். மேலும், இறுதி ஆற்றல் T_f-ஐ அடையக்கூடிய தொடக்க கலைக்கோண மதிப்புகள் மிகச் சிறிய எல்லைக்குள்ளேயே அடங்கிவிடுவதும் புலனாகும். எனவே, ω_{rf}-ஐ ω_0-க்குச் சமமாக்குவதால், 'ஏற்கத் தகுந்த' கலைக்கோண நெடுக்கம் மிகவும் சிறிதாகி விடும் என்பது தெளிவாகும். ஆகவே, $\omega_{rf} = \omega_0$ என அமைப்பது உகந்ததன்று.

$\omega_{rf} < \omega_0$ என அமைப்போமானால், ஒத்திசைவு விதி ($\omega_{rf} = \omega_0$) தொடக்கத்தில் நிறைவேறாவிட்டாலும், துகள் முடுக்கம் பெற்று இயங்கும்போது ஒரு கட்டத்தில் அவ் விதி நிறைவேறும். இவ்விதம் $\omega_{rf} < \omega_0$ என அமைப்பதால், பெரும ஆற்றல் T_m ஆனது முடுக்க எல்லைக்குள்ளேயே அமைகின்றது. இப்பொழுது $Cos\phi$-க்கும் T-க்கும் இடையே அமையும் தொடர்பைப் படம் 5.7-ல் காணலாம்.



படம் 5.7 $Cos\phi - T$ படம்

இந்த வரைபடத்தில் $Cos\phi$-ஆனது முதலில் உயர்ந்து, பின் குறைகின்றது. எனவே, துகள் நீண்டநேரம் பொறியில் இயங்க

வாய்ப்புள்ளது. மேலும், பயனுள்ள கலைக்கோணங்களின் எல்லை பரந்து அமைவதையும் படம் 5.7-ல் காணலாம்.

T_m - ஆனது $\frac{T}{2}$ -க்குள் (படம் 5.7) அமையுமாறு ω_{rf}-ன் மதிப்பைச் சீரமைப்பதன் மூலம் பயனுள்ள கலைக்கோணங்களின் நெடுக்கம் பரந்து நிற்கும். துகளின் ஓய்வு ஆற்றல் E_0 எனில்,

$$T_m + E_0 = E$$

ஆகும். எனவே,

$$T_m = E_0 \left(\frac{E}{E_0} - 1 \right)$$

$$= E_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega_{rf}} - 1 \right)$$

ஆகும். $T_m = T_f/2$ எனக் கொள்வோமாயின்,

$$\frac{T_f}{2} = E_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega_{rf}} - 1 \right)$$

அல்லது,

$$\frac{\omega_0}{\omega_{rf}} - 1 = \frac{T_f}{2E_0}$$

$$\therefore \quad \frac{\omega_0}{\omega_{rf}} = 1 + \frac{T_f}{2E_0}$$

ஆகவே,

$$\omega_{rf} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{T}{2E_0} \right) \qquad (5.31)$$

ஆகும். சமன் 5.31-லிருந்து ω_{rf} ஆனது ω_0 வை விடக் குறைவாக இருப்பது புலப்படும். இவ்விதம் அலைவானின் கோண அதிர்வெண்ணைச் சீரமைப்போமானால் கலைக்கோண நெடுக்கம் பரந்து நிற்பதுடன், துகள் சீரான ஆற்றல் பெறவும் வாய்ப்புண்டு.

மேற்கண்ட முடிபுகளைப் பெறுவதில் சில கருத்துகளை நினைவிற் கொண்டோம். அவற்றுள் ஒன்று காந்தப்புலம் சீராக அமைவதென்பதாகும். ஆனால், காந்தப்புலம் சீராக இல்லாமல் ஆரத்திசையில் குறைவதாக அமையுமானால், மேற்கண்ட முடிபுகள் பாதிக்கப்படலாம். காந்தப்புலம் ஆரத்திசையில் குறைவாக அமையுமானால், சமன் 5.25-ஐத் தொகுநிக் காணல் எளிதன்று. மேலும் காந்தப் புலத்தின் இந்தப் பண்பிற்கேற்ப $Cos\phi$ -க்கும் T -க்கும் வரைபடம் வரைவோமெனில், அதிபர வளையங்களை (*Hyperbolas*) பெற முடியாது (படம் 5.5). ஆனால், காந்தப்புலம் B சிறிது சிறிதாகவே குறையுமாதலால், இந்த வரைகோடுகள் பெரும்பாலும் பரவளையங்

களைப் போலவே அமையும். எனவே, நாம் முன்னர் பெற்ற முடிவுகளே பெரும்பாலும் இவ் வரைகோடுகளுக்கும் பொருந்தும் எனலாம்.

தவிர, முடுக்கந்தரு இடைவெளியின் அகலம் மிகச் சிறியது எனக் கொண்டோம். ஆனால், அயனிவாயிலிருந்து வெளிவரும் அயனிகளைக் கருதும்போது, இவ்விதம் Dக்களுக்கு இடையிலுள்ள வெளி சிறிதாக அமைவது உகந்ததோ என்றுதான் ஐயம் எழும். ஏனெனில், அயனி வாயிலிருந்து வெளிவரும் தருணத்தில் அயனிகள் மிகக் குறைந்த வேகமே பெற்றிருக்கும். எனவே, அவை வெளிவந்த உடனேயே Dக்குள் நுழையா. முதல் சுற்றில், அவை இடைவெளியிலேயே, மின்புலம், காந்தப்புலம் இரண்டிற்கும் உட்படும். பின்னர் தான் அவை ஏதாவதொரு D-யினுள் நுழையும். இத்தகைய அயனிகளைக் கருதும்போது இடைவெளி மிகச் சிறிதாக அமைவது ஏற்புடைத்தன்று. ஆனால், துகள்களின் ஆற்றல் பெருகப்பெருக அவற்றின் வேகமும் பெருகுமாதலால், துகள் D-யுள் இயங்க எடுத்துக் கொள்ளும் நேரத்துடன் ஒப்பிடும்போது இடைவெளியைக் கடக்கத் தேவைப்படும் நேரம் மிகமிகக் குறைவானதாகும். ஆகவே, இடைவெளியின் அகலம் சிறியது எனக்கொண்டு சில தொடர்புகளைப் பெற்றது தவறில்லை.

5.6. பெரும ஆற்றல் அடைவதற்குரிய வழிகள்

துகளின் இயக்க ஆற்றல், காந்தப்புலம் இவற்றை இணைக்கும் தொடர்பை முன்னரே பெற்றோம் (சமன் 5.10). இதில் E_0 உடன் ஒப்பிடும்போது T மிகச் சிறியதாக இருப்பதால்,

$$Bqrc \approx \sqrt{2TE_0} \qquad (5.32)$$

எனலாம்.

$$\therefore\ Br = \frac{\sqrt{2TE_0}}{qc}$$

அல்லது,

$$Br = \frac{E_0}{qc}\sqrt{\frac{2T}{E_0}}$$

$$\therefore\ Br = \frac{M_0c}{q}\sqrt{\frac{2T}{E_0}} \qquad (5.33)$$

ஆகும். எனவே,

$$B^2r^2 = \frac{M_0^2c^2}{q^2}\ \frac{2T}{E_0}$$

$$= \frac{2M_0T}{q^2}$$

$$\therefore \quad T = \frac{q^2 r^2 B^2}{2M_0}$$

ஆகவே, $$T_{\text{பெருமம்}} = \frac{q^2 B^2 \; r^2_{\text{பெருமம்}}}{2 M_0} \qquad (5.34)$$

என்று பெறலாம்.

ரேடியோ அதிர்வெண் மின்னழுத்தத்தின் அலைநீளம் λ எனில்,

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega_{rf}} \qquad (5.35)$$

ஆகும். காந்த ஒத்திசைவு நிகழ $\omega = \omega_{rf}$ ஆகவேண்டும் என அறிவோம். மேலும்,

$$\frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{v}{r}$$

$$\approx \frac{1}{2\pi} \frac{Bq}{M_0}$$

ஆகும்.

$$\therefore \quad B = \frac{2\pi M_0}{q}\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \qquad (5.36)$$

ஒத்திசைவின் போது $\frac{\omega_{rf}}{2\pi} = \frac{\omega}{2\pi}$ ஆதலால்,

சமன் 5.35, சமன் 5.36 லிருந்து,

$$B = \frac{2\pi M_0}{q} \frac{c}{\lambda} \qquad (5.37)$$

என்று பெறலாம். இம் மதிப்பை சமன் 5.34 -ல் பதிலீடு செய்ய

$$T_{\text{பெருமம்}} = \frac{q^2 r^2_{\text{பெருமம்}}}{2M_0}\left(\frac{2\pi M_0}{q} \frac{c}{\lambda}\right)^2$$

அல்லது, $$T_{\text{பெருமம்}} = \frac{2\pi^2 M_0 c^2}{\lambda^2} r^2_{\text{பெருமம்}} \qquad (5.38)$$

ஆகவே, $$\frac{T_{\text{பெருமம்}}}{M_0 c^2} = \frac{2\pi^2}{\lambda^2} r^2_{\text{பெருமம்}}$$

$$\therefore \frac{T_{\text{பெருமம்}}}{E_0} = \frac{2\pi^2}{\lambda^2} r^2_{\text{பெருமம்}} \qquad (5.39)$$

ஆகும். சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகளின் பெருமம ஆற்றலை அதிகப்படுத்துவதற்குள்ள வாய்ப்புக்களை ஆராய, கோவை 5.39 பெரிதும் துணை செய்யும். λ - ன் மதிப்பை சிறிதாக்குவதன் மூலம், பெருமம ஆற்றலை அதிகரிக்கலாம். ஆனால், இவ்விதம் λ - ஐச்

சிறிதாக்குவோமானல் தொடர்பு 5.37 ன் படி B மிகப் பெரிதாகும். ஆனல், காந்தப்புல மதிப்பை நாம் விரும்பும்வா றெல்லாம் பெரிதாக்குதல் எளிதன்று. காட்டாக, B-ன் மதிப்பை 2 வெபர்/மீட்டர்^{2} -ஐ விட அதிகமாக்க வேண்டுமென்ருலும் செலவு மிகவும் அதிகமாகும். எனவே λ -ன் சிறுமமதிப்பு, வரம்புக்குள் அடங்குகின்றது. மேலும் λ -ன் மதிப்பு சிறிதாகுமானல் D க்களின் கொள்ளளவும் குறைக்கப்பட வேண்டும். இவ்விதம் Dக்களின் கொள்ளளவைக் குறைத்தால் பொறியின் வடிவமைப்பில் இடையூறுகள் தோன்றலாம். இவ் விரு காரணங்களாலும் λ - ன் சிறும மதிப்பு 10 முதல் 20 மீட்டருக்குள் அடங்குகின்றது. இந்தக் காரணத்தால் பெரும ஆற்றல் T பெருமமும் - குறிப்பிட்டதொரு மதிப்பிற்குமேல் மிகமுடியாது.

ஆகவே λ-விற்குக் கீழ்வரம்பு விதித்துவிட்ட காரணத்தால், வேறு வழிகளில் ஆற்றலைப் பெருக்க முடியுமா என்று காண்போம். தொடர்பு 5.39 -ன் படி T பெருமம் $\propto r^2$ பெருமம்; ஆகவே, காந்தப் புல ஆரத்தைப் பெரிதாக்குவதன் மூலமும் T பெருமத்தின் மதிப்பை அதிகமாக்கலாம். ஆனல், இவ்விதம் ஆரம் மிகுமானல் அடுத்தடுத்த வட்டத் தடங்கள் நெருக்கமாக அமையும். மேலும், காந்தப்புல ஆரம் அதிகமாகப் பொறியின் அளவு முழுதுமே பெரிதாக்கப்பட வேண்டும். இந்தக் காரணங்களால் r பெருமமும் குறிப்பிட்ட அளவுவரைதான் பெரிதாக்கப்படமுடியும். இதனல், மேற்கண்ட இருமுறைகளையும் தவிர, வேறு முறைகளில் ஆற்றலைப் பெருக்குதல் இயலுமா எனக் காண்போம்.

சமன் 5.39 -ன்படி ஆற்றலைப் பெருக்க இனி ஒரேயொரு வழி தான் உள்ளது. λ - ம், r - ம் மாறிலிகளாக அமையுமெனில், T பெருமம் துகளின் ஓய்வுநிலை ஆற்றல் E_0 உடன் நேர்விகிதத்தில் இருக்கும்; அல்லது, Tபெருமம் $\propto M_o$ எனவும் கூறலாம். எனவே λ, r இவற்றின் மதிப்புகளைப் பெரும ஆற்றல் கிடைக்குமாறு அமைத்த பின்னர் துகள்கள் அடையக்கூடிய இறுதி ஆற்றலானது அவற்றின் ஓய்வுநிலை நிறையையே சார்ந்திருக்கும் என்பது தெளிவாகும்.

இவ்விதம் λ, r இரண்டுமே உரிய மதிப்புகள் பெற்றுள்ள பொறியொன்றில், புரோட்டான் (*Proton*), டாய்ட்ரான் (*Deutron*), ஆல்ஃபாத் துகள் (*Alpha Particle*) ஆகியவை முடுக்கப்படுவதாகக் கருதுவோம். இப் பொறியில் புரோட்டான் 4 MeV ஆற்றல்பெறும் எனில், டாய்ட்ரான் 8 MeV ஆற்றலும், ஆல்ஃபாத் துகள் 16 MeV ஆற்றலும் பெறும். சமன் 5.37 - ல் λ - மாறிலியெனில் $B \propto \frac{M_o}{q}$ ஆகும். புரோட்டானின் நிறை, மின்னூட்டம் இரண்டுமே ஓரலகு

எனக் கொள்வோம். எனவே புரோட்டான், டாய்ட்ரான், ஆல்ஃபாத்துகள் ஆகிய மூன்றிற்கும் இடையேயான விகிதம் முறையே 1:2:2 என அமையும். எனவே புரோட்டான் இயங்கும்போது இருக்கும் காந்தப் புலத்தைத் போல் இருமடங்கு காந்தப் புலத்தில் டாய்ட்ரானும் ஆல்ஃபாத்துகளும் இயங்கினுல்தான்,

புரோட்டானின் T பெருமம் $\propto$ M_0 புரோட்டான்
டாய்ட்ரானின் T பெருமம் $\propto$ M_0 டாய்ட்ரான்
ஆல்ஃபாத்துகளின் T பெருமம் $\propto$ M_0 ஆல்ஃபாத்துகள்

என்ற தொடர்பு நிறைவுபெறும்.

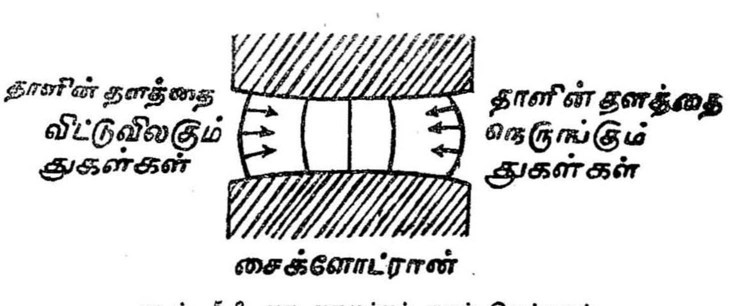
5.7. காந்தப் புல அமைப்பின் விளைவுகள்

காந்தங்களின் அமைப்பைச் சார்ந்தே காந்தப் புலமும் அமைகின்றது. எல்லா சைக்ளோட்ரான்களிலும் காந்தத்தின் வடிவம் ஏறத்தாழ ஒரே மாதிரியாகத்தான் அமையும். சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகள் பெறக்கூடிய பெரும ஆற்றல் T பெருமம் $\propto r^2$ எனக் கண்டோம். இதில் r என்பது பயனுள்ள (*Useful*) காந்தப்புல ஆரமாகும். மேலும், காந்தத்தின் எடை G டன்கள் $\propto r^3$ ஆதலால், துகளின் ஆற்றல் E க்கும் G க்கும் உள்ள தொடர்பை

$$G \approx 1{\cdot}5E^{3/2} \qquad (5.40)$$

என எழுதலாம்.

சைக்ளோட்ரானில் உள்ள துருவமுனைகள் படம் 5.8 - ல் உள்ளவாறு அமைந்திருக்கும். துருவமுனைகள் இவ்விதம் சாய்வாக வெட்டப்

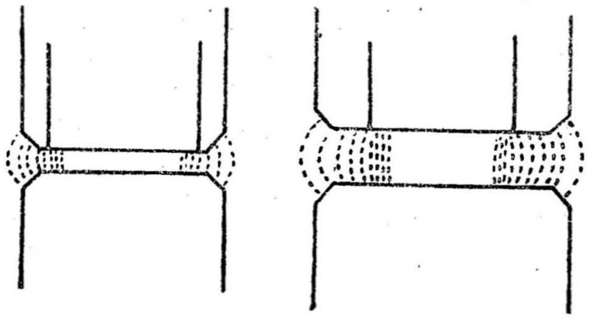


படம் 5.8 புல அமைப்பும் துகள் இயக்கமும்

படுவதால், துகள்களைக் காக்கவல்ல புல அமைப்பு தோன்றும். துகள்களின் வேகத்தை மேல்நோக்கியும் கீழ்நோக்கியும் இரு

கூறுகளாகப் பகுக்கலாம். பொறியில் துகள்கள் ஆயிரக்கணக்கான சுற்றுகள் சுற்றுகின்றன. மிக நீண்ட பாதையில் இயங்குகின்றன. எனவே, வேகத்தின் இரு கூறுகளையும் திருத்தவேண்டும். இல்லை யெனில் அந்தத் துகள்கள் D -ன் சுவர்களுடன் தெறித்து மோதலாம். இதனால், அந்தத் துகள்களை நாம் இழந்து போக நேரிடும். இதனால், காந்தப்புல அமைப்பைச் சீர்செய்து துகள்களை இழப்பிலிருந்து காக்க வேண்டியுள்ளது. காந்தப்புலம் ஓரளவு எதிர் வாட்டம் (*Negative Gradient*) உடையதாக அமையுமானால், விசைக் கோடுகள் (படம் 5.8) உள்நோக்கிக் குழிந்திருக்கும். இந்நிலையில் மத்திய தளத்தைவிட்டு விலகியுள்ள துகள்களின்மீது செயல்படும் மீட்புவிசை (*Restoring Force*) துகள்களை மத்திய தளத்தை நோக்கிக் குவிக்கும்.

துருவமுனைகளுக்கு இடையேயுள்ள தூரம் குறைந்ததாக இருக்குமெனில், ஆரத்திசை நோக்கிய புலத்தின் சிதைவு குறிப்பிடத்தக்கதாக அமையும் (படம் 5.9 - (b)). எனவே, துகள்களைக் காக்கவல்ல விசை செயற்படும். ஆனால், இந்தத் தூரம் மிகச் சிறியதாக அமையுமானால்,



(a) (b)

படம் 5.9 துருவங்களுக்கிடையேயான தூரமும் புல அமைப்பும்

வெற்றிட அறையையும் D க்களையும் வைப்பது கடினமாகி விடும். படம் 5.3 -ல் உள்ளவாறு வெற்றிட அறை பொறியுள் இருக்குமானால், காந்தப் புலத்தைத் திருத்துவது எளிமையாக முடியும். வெற்றிட அறைக்கும் காந்தமுனைக்கும் இடையே போதுமான இடைவெளி இருப்பதால், அந்த இடைவெளியில் இரும்புத் தகடுகளை நுழைப்பதன்மூலம் புலஅமைப்பைத் திருத்தலாம்.

இந்த இழப்புக்கெல்லாம் ஈடுகொடுத்து சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகள்கற்றை, விலக்கியால் விலக்கப்பட்டுக் கற்றையாக

வெளிவருகின்றது (படம் 5.4). இந்த மீள் கற்றை (*Emergent Beam*) செறிவுமிக்கதாக அமைய, மையத்தில் அயனிவாய் உள்ள இடத்தில் காந்தப்புலத்தின் செறிவை அதிகமாக்க வேண்டும்.

காந்தப்புலம் உருவாக்கப்பட்டவுடன் காந்தப்புலத்தின் இடைத் தளம் (*Median Plane*) மத்திய தளத்துடன் (*Centre Plane*) பொருந்துமாறு செய்யவேண்டும். இடைத்தளத்திற்கு இணையான காந்தப்புலக்கூறு $B_r = 0$ ஆதலால், இப் பண்பின் மூலம் இடைத் தளத்தின் நிலையைத் தீர்மானிக்கலாம். கம்பியாலான கண்ணி ஒன்றை (*Loop of Wire*) துருவங்களுக்கு இடையில் தக்கையால் தாங்க வேண்டும். அயனிகள் சுழலும் திசைக்கு எதிர்த் திசையில் அக் கம்பியின் வழியே நேர்மின்னூட்டம் (*Direct Current*) செலுத்தப்படும். இதனால், அக் கம்பியானது, தன்னால் முடிந்தவரை பாயத்தைப் (*Flux*) பெற முயன்று வட்ட வடிவம் பெறும். இக் கண்ணியைத் துருவங்களுக்கு இடையில் வைத்தால் தக்கையின்மேற் செயற்படும் விசைகள் அதை நிலைகுலையச் செய்யும். ஆனால், இடைத்தளத்தில் அந்தக் கண்ணி சரியாகப் பொருந்துமெனில் B_r சுழியமாதலால் அது நிலைகுலையாது. ஆகவே, இவ்விதமாகக் காந்தப்புலத்தின் இடைத்தளத்தைத் தீர்மானிக்கலாம். இவ்விதம் தீர்மானிக்கப்பட்ட இடைத்தளம் துருவ முனைகளுக்கு இடையேயுள்ள மத்திய தளத்தோடு பொருந்தவேண்டும். இரு தளங்களும் அவ்வாறு பொருந்தா விட்டால், இரு துருவங்களின் காந்த மறுப்பு (*Magnetic Reluctance*) - க்கும் இடையே வேறுபாடு உள்ளது என்று பொருள். மேலும் கீழுமுள்ள கிளர் சுருள்களின் (*Exciter Coils*) சுற்றுகளின் எண்ணிக்கையைத் தேவையான முறையில் மாற்றுவதன் மூலம், இரு துருவங்களின் காந்த மறுப்பு (*Magnetic Reluctance*) – க்கும் இடையே உள்ள வேறுபாட்டை விலக்கலாம்.

மேலும், கிளர் சுருள்களின் வழியே மின்சாரம் தொடர்ந்து பாய்வதால் அவை சூடேற்றப்படலாம். எனவே, இந்த வெப்பத்தைத் தணிக்கக் கிளர் சுருள்கள் குளிர்விக்கப்படவேண்டும். காந்தங்களை எப்பொழுதுமே வெப்பச் சமநிலைப்பாடு (*Thermal Equilibrium*) உடையனவாக அமைத்தல் நலம்.

5.8. முடுக்கத்தை முடித்தல்

சைக்ளோட்ரானில் அயனிவாயிலிருந்து வெளிவரும் அயனிகள், சுருள் பாதையில் இயங்கிப் பெரும ஆரமுடைய வட்டத் தடத்தை அடையும்போதுதான் பெரும ஆற்றலை அடைய முடியும். இவ்விதம் பெரும ஆற்றலை அடையும் துகள்களை ஓர் இலக்கின்மேல் மோதச் செய்தோ, அல்லது காந்தப் புலத்தினின்று மீட்டுப் புலஆதிக்க மற்ற வெளியில் நுழையச் செய்வதன் மூலமோ, முடுக்கத்தை

முடிக்கலாம். பெரும ஆற்றலடைந்த அயனிக்கற்றை இலக்கில் மோதுவதால், இலக்கு கதிர்வீச்சினைத் தரும் பண்பைப் பெறுகின்றது. இதனால், இலக்கிலிருந்து நியூட்ரான் கற்றை வெளிவரலாம். புரோட்டான், டாய்ட்ரான் போன்ற துகள்கள் இப் பொறியில் முடுக்கம் பெறும்போது இலக்கின்மேல் மோதி நியூட்ரான்களைத் தோற்றுவிக்கலாம். இத்தகு கதிர்வீச்சுகளால் சைக்ளோட்ரானை இயக்குவோர் பாதிக்கப்படாமலிருக்கப் பொறியைத் தகுந்த முறையில் உறையிடுதல்வேண்டும். இலக்கை Dக்களுக்கு இடையிலோ, அல்லது வெளியிலோ அமைக்கலாம். இலக்கு Dக்களுக்கு வெளியில் அமைக்கப்படுமானால், பல்வேறு உலோகங்களால் ஆன இலக்கைப் பயன்படுத்தி ஆய்வுநிகழ்த்துதல் எளிதாகும்.

சைக்ளோட்ரானில் துகள்கள் சுருள்பாதையில் இயங்குவதால், துகள்களை மீட்பது எளிதெனத் தோன்றலாம். ஆனால், நடைமுறையில் சைக்ளோட்ரானிலிருந்து துகள்களை மீட்பது எளிதன்று. சைக்ளோட்ரானில் காந்தப்புலம் ஆரத்திசையில் குறையுமாதலால், காந்தப் புலம் சிதையும் பகுதியைத் துகள் நெருங்கியவுடன், துகளின் கலைக்கோணம் மிக வேகமாகச் சுழியத்தை நோக்கிப் பெயர்ச்சி அடையும். காந்தப்புலத்தை விட்டு வெளியேறும் முன்பே துகளின் கலைக்கோணம் சுழியமாகுமெனில் எதிர் முடுக்கம் உருவாகும். இதனால் துகளின் ஆற்றலில் இழப்பு ஏற்படுவதுடன், தடஆரமும் குறையத் தொடங்கும். எனவே, துகளின் கலைக்கோணம் சுழியமாகு முன்பே அதைக் காந்தப் புலத்தை விட்டு மீட்கவேண்டும்.

5.9. சைக்ளோட்ரானின் குறிப்பிடத்தக்க இயல்புகள்

சைக்ளோட்ரானில் புரோட்டான், ஆல்ஃபாத்துகள், டாய்ட்ரான் போன்ற நிறைமிகு துகள்களை முடுக்கலாம் எனக் கண்டோம். சைக்ளோட்ரான் பெரும்பாலும் அதன் விட்டத்தால் குறிக்கப் பெறும். காட்டாக 1·524 மீட்டர் சைக்ளோட்ரான் (60″) எனில், அச் சைக்ளோட்ரானின் விட்டம் 1·524 மீட்டர் என்று பொருள். நேரியல் முடுக்கிக்குப் பின் அணுஇயற்பியல் ஆராய்ச்சிகளில் சைக்ளோட்ரான் பெரிதும் பயன்பட்டது.

எலெக்ட்ரான் மிக விரைந்து ஒளிவேகத்தை நெருங்கவல்லதாதலால், அதனியக்கம் சார்பியல் கொள்கையால் நிறுவப்பட வேண்டும். இதனால், சைக்ளோட்ரானுக்குரிய காந்த ஒத்திசைவை உருவாக்க முடியாது. எனவே, எலெக்ட்ரானை முடுக்க சைக்ளோட்ரானையொட்டிப் பிறந்த பொறி மைக்ரோட்டான் ஆகும்.

5.10. மைக்ரோட்ரான்

மைக்ரோட்ரான் (*Microtron*) என்று அழைக்கப்படும் இந்தப் பொறி, வெக்சலர் என்பவரால் 1944-ல் அமைக்கப்பட்டது.

அட்டவணை 5.1

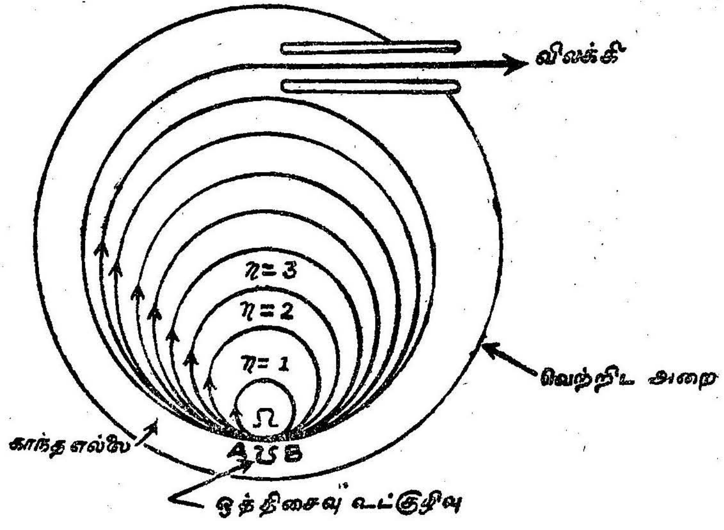
சைக்ளோட்ரானின் இயல்புகள்

அளபுருபு	அலகு	பெர்க்கிலி	செயின்ட் லூயி	பர்மிங்காம்
துருவத் துண்டுகளின் விட்டம்	மீட்டர்	0·9398	1.143	1·5621
இரும்பின் எடை	டன்கள்	75	80	250
பாய அடர்த்தி	வெபர்/மீ^{2}	1.57	1.43	1·35
பெரும D மின்னழுத்தம்	கிலோவாட்	40—60	50	80
பெரும டாய்ட்ரான் ஆற்றல்	MeV	8.5	12	20
கற்றையின் மின்னோட்டம்				
(i) சுழலும் கற்றை	மைக்ரோ ஆம்பியர்	100	150—250	300
(ii) வெளியேறும் கற்றை	மைக்ரோ ஆம்பியர்			≈70

எலெக்ட்ரான்களை முடுக்க இந்தப் பொறி பெரிதும் பயன்படும். மாறு அதிர்வெண் சைக்ளோட்ரானில் (*Fixed Frequency Cyclotron*) அதி வேகத்துடன் துகள்கள் இயங்கும்போது அவற்றின் நிறையில் மாற்றம் ஏற்படலாம் என்று கண்டோம். எனவே, உயர்வேகங்களில் துகளின் சுற்று அதிர்வெண், மின்புல அதிர்வெண்ணோடு ஒத்திசைவு பெறாது. ஆகவே, சார்பியல் கொள்கைப்படி துகளின் நிறையில் ஏற்படும் இந்த மாற்றத்தால் ஒளிவேகத்தை நெருங்கும் துகள்களை முடுக்க, சைக்ளோட்ரானைப் பயன்படுத்த முடியாது. எலெக்ட்ரான் ஒருசில சுற்றுகளிலேயே ஒளியின் வேகத்தை நெருங்கி விடுவதால் சைக்ளோட்ரானில் இதை முடுக்க முடியாது.

எனவே, சைக்ளோட்ரான் தத்துவத்தையே பயன்படுத்தி ஒருசில மாறுதல்களுடன் அமைந்த புதிய பொறி ஒன்று பிறந்தது. இதுவே மைக்ரோட்ரான் ஆகும். இது எலெக்ட்ரான் சைக்ளோட்ரான் என்றும் அழைக்கப்படும். மைக்ரோட்ரானில் இயங்கும் துகள் ஒவ்வொரு சுற்றின் போதும் ஈட்டும் ஆற்றல் அதே அளவாக இருக்கும்படி அமைக்கப்பட்டுள்ளது. காட்டாக E_0 என்ற ஓய்வு நிலை ஆற்றலுடன் மைக்ரோட்ரானில் தன் பயணத்தைத் தொடங்கும் துகள் ஒன்றைக் கருதுவோம். ஒரு சுற்றின் முடிவில் இதன் ஆற்றல் $(E_0+\Delta\varepsilon)$ ஆக மாறுவதாகக் கொள்வோம். இரண்டாம் சுற்றின் முடிவில் துகளின் ஆற்றல் $(E_0+2\Delta\varepsilon)$ ஆகும். இந்தத் தத்துவப்படி இயங்கும் மைரோட்ரானின் அமைப்பைப் படம் 5.10 - ல் காணலாம்.

5.11. அமைப்பும் இயக்கமும்



படம் 5.10 மைக்ரோட்ரான் அமைப்பு

சீரான காந்தப்புல எல்லையொன்றில் ABஎன்னும் முடுக்குகின்ற ஒத்திசைவு உட்குழிவு ஒன்றுள்ளது. உட்குழிவில் எலெக்ட்ரான்கள் இயங்க வசதியாக இரு துளைகள் உள்ளன. இவ் உட்குழிவு நிலையான அதிர்வெண் *(Fixed Frequency)* கொண்ட அலைவான் ஒன்றுடன் இணைக்கப்பட்டுள்ளது. உட்குழிவில் உள்ள ஒரு துளையின் விளிம்பே எலெக்ட்ரான்களின் தோற்றுவாய் ஆகும். இதிலிருந்து தோன்றும் எலெக்ட்ரான்கள் செறிவுமிக்க மின்புலம் ஒன்றால் உள்ளிழுக்கப் படுகின்றன. இதற்குப் பதிலாகச் சூடேற்றப்பட்ட இழையையும் *(Hot Filament)* எலெக்ட்ரான் தோற்றுவாயாகப் பயன்படுத்தலாம். இவ்விழை, உட்குழிவின் துளையொன்றிற்கு அருகில் அமைக்கப்படும். எனவே, வெப்பநிலை அயனி வெளியிடுதல் *(Thermionic Emission)* காரணமாகத் தோன்றும் எலெக்ட்ரான்கள்,உட்குழிவினுள் நுழைந்து முடுக்கம் பெறலாகும்.

இந்தப் பொறியில் அமையும் துகளின் தடம், தனக்கே உரிய தொரு வடிவம் பெற்றிருக்கும் (படம் 5.10). படத்தில் காட்டப் பட்டுள்ளவாறு அடுத்தடுத்த தடங்கள் பெரும் பெரும் ஆரமுடையன வாக அமையும். எல்லா வட்டத்தடங்களும் பொதுவாக ஒரேயொரு தொடுகோட்டைப் பெற்றிருக்கும். இத் தொடுகோடு உள்ள இடத்தில்தான் துகள்கள் உட்குழிவினுள் நுழைந்து வெளியேறும்.

q மின்னூட்டமும், E_0 ஓய்வுநிலை நிறையும் உடைய துகள், ω கோண அதிர்வெண்ணுடன் சைக்ளோட்ரானில் இயங்குமெனில்,

$$\omega = \frac{qBc^2}{E} \tag{5.42}$$

என்று அறிவோம். எனவே, துகளானது ஒரு சுற்றை முடிக்கத் தேவையான நேரம் τ எனில்,

$$\tau = \frac{2\pi E}{Bqc^2} \tag{5.43}$$

ஆகும். இனி, செயல்படும் காந்தப்புலம் மாறிலிஎனக் கொள்வோம். சுழலும் நேரத்தில் ஏற்படும் மாற்றம் $\triangle\tau$ – எனில்,

$$\triangle \tau = \frac{2\pi \triangle E}{B\,q\,c^2} \tag{5.44}$$

ஆகும். அதாவது, $\triangle \tau \propto \triangle E$ (5.45)

ஆகவே, துகளின் சுழலும் நேரத்தில் ஏற்படும் மாற்றமானது ஆற்றலில் ஏற்படும் மாற்றத்தைச் சார்ந்துள்ளது எனவும், மொத்த ஆற்றலைச் சார்ந்ததில்லை எனவும் அறியலாம். இந்தத் தத்துவத்தைச் செயல்படுத்தித்தான் மைக்ரோட்ரான் இயக்கப்படுகின்றது.

ஒவ்வொரு சுற்றை முடிக்கும் போதும் துகள் ஈட்டும் ஆற்றல் ΔE எனக் குறிப்போம். இந்த ஆற்றல், துகளின் ஒய்வுநிலை ஆற்றல் E_0 -ல் ஒரு கூறு எனில், $\Delta E = \varepsilon E_0$ (5.46)

எனக் குறிக்கலாம். அதாவது, ஓய்வுநிலையில் இருந்த எலெக்ட்ரான் ஆனது, முடுக்கும் உட்குழிவைக் கடந்து ஒரு சுற்றை முடித்துப் பெறும் ஆற்றல் εE_0 ஆகும். எனவே, ஒரு சுற்றின் முடிவில் எலெக்ட்ரானின் மொத்த ஆற்றல்,

$$E_1 = E_0 + \varepsilon E_0 \tag{5.47}$$

என்றாகும். இனி, இந்த E_1 ஆற்றலுடைய துகளானது பொறியில் இரண்டாம் சுற்றைத் தொடங்கும். இப்பொழுது துகளின் சுழலும் நேரம் τ_1 எனில்,

$$\tau_1 = \frac{2\pi (E_0 + \varepsilon E_0)}{Bqc^2}$$

ஆகும்.

அல்லது, $$\tau_1 = \frac{2\pi E_0 (1 + \varepsilon)}{B q c^2} \tag{5.48}$$

ஆகவே τ_1 கால அளவில், இரண்டாம் சுற்றை முடிக்கும் துகள், மீண்டும் உட்குழிவை அணுகும். துகளானது மின்புலத்தை முதலில் சந்தித்த கலைக்கோணத்திலேயே இப்பொழுதும் சந்தித்தால்தான் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவும். துகளும் ஆற்றல் இழப்பைப் பெறாது.

அலைவானின் அலைவுநேரம் τ_{rf} எனில், கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவ, எலெக்ட்ரானின் சுற்று அதிர்வெண், அலைவானின் அதிர் வெண்ணோடு நேர்விகிதத்தில் இருக்கவேண்டும். ஆகவே,

$$\tau_1 \propto T_{rf}$$

ஆகும், அல்லது, $$\tau_1 = a\, \tau_{rf} \tag{5.49}$$

இதில் a என்பது ஒரு மாறிலியாகும். நிலைப்பாடு நிலவ இது ஓர் முழு எண்ணாக அமையவேண்டும். சமன்கள் 5.48, 5.49 -லிருந்து

$$\frac{2\pi E_0}{B q c^2} (1 + \varepsilon) = a\, \tau_{rf} \tag{5.50}$$

என்று பெறலாம்.

இத்தகு நிலைப்பாடு நிலவுமானால்,இரண்டாம் சுற்றின் முடிவிலும் துகளானது மின்புலத்தை உரிய கலைக்கோணத்தில் நாடி ஆற்றல் ஈட்டும். இப்பொழுது துகளின் மொத்த ஆற்றல் $(E_0 + 2\varepsilon E_0)$ ஆகும். எனவே, துகளின் சுற்று நேரம், $\tau_2 = \dfrac{2\pi (E_0 + 2\varepsilon E_0)}{B q c^2}$

அல்லது,
$$\tau_2 = \frac{2\pi E_0 (1 + 2\varepsilon)}{B q c^2} \quad (5.51)$$

எனவே, சமன்கள் 5.48, 5.51 -லிருந்து,

$$\tau_2 - \tau_1 = \frac{2\pi E_0}{B q c^2}\varepsilon \quad (5.52)$$

ஆகும்.

சமன் 5.52 லிருந்து கால வேறுபாடானது, ஆற்றல் மாற்றத்தையே சார்ந்துள்ளது என்று அறியலாம்.

$$\therefore \quad \tau_2 - \tau_1 \propto \varepsilon E_0 \quad (5.53)$$

எனக் குறிக்கலாம். அல்லது,

$$\tau_2 - \tau_1 = b\tau_{rf} \quad (5.54)$$

எனவும் எழுதலாம். இதில் b என்பது ஒரு மாறிலியாகும். நிலைப்பாடு நிலவ, இது ஒரு முழு எண்ணாக அமைய வேண்டும்.

இரண்டாம் சுற்றை முடித்து, மூன்றும் சுற்றைத் தொடங்கும் துகள், மூன்றும் சுற்றின் முடிவிலும் மின்புலத்தை அதே கலைக் கோணத்தில் சந்திக்கும்.

எனவே,
$$\tau_3 - \tau_2 = b\,\tau_{rf} \quad (5.55)$$

ஆகும்.

இதனால் $(\tau_2 - \tau_1) = (\tau_3 - \tau_2) = (\tau_4 - \tau_3) \ldots\ldots = b\tau_{rf}$ (5.56)

என்று எழுதலாம். இனிச் சமன் 5.50 லிருந்து,

$$\frac{2\pi E_0}{B q c^2}\frac{(1 + \varepsilon)}{a} = \tau_{rf} \quad (5.57)$$

ஆகும். மேலும் சமன்கள் 5.52, 5.54 -லிருந்து

$$\frac{2\pi E_0 \varepsilon}{B q c^2} = b\,\tau_{rf}$$

என்றாகும். அல்லது,

$$\frac{2\pi E_0}{B q c^2}\frac{\varepsilon}{b} = \tau_{rf} \quad (5.58)$$

எனவே, சமன்கள் 5.57, 5.58 லிருந்து,

$$\frac{2\pi E_0}{B q c^2} \frac{(1+\varepsilon)}{a} = \frac{2\pi E_0}{B q c^2} \frac{\varepsilon}{b}$$

என்று பெறலாம்.

$$\therefore \quad (1+\varepsilon) = \frac{a}{b}\varepsilon$$

அல்லது,

$$\varepsilon = \left(\frac{b}{a-b}\right) \tag{5.59}$$

ஆகும். சமன் 5.59 லிருந்து ε-ன் மதிப்பைச் சமன் 5.58-ல் பதிலீடு செய்ய,

$$\frac{2\pi E_0}{Bq\, c^2 b}\left(\frac{b}{a-b}\right) = \tau_{rf} \tag{5.60}$$

என்று பெறலாம். அல்லது,

$$\tau_{rf} = \frac{2\pi E_0}{B q c^2} \frac{1}{(a-b)} \tag{5.61}$$

ஆகும். சமன் 5.61 அலைவானின் அதிர்வெண்ணுக்கும் எலெக்ட்ரானின் பண்புகளுக்கும், இடையேயான தொடர்பாகும்.

அலைவானின் அலைநீளம் λ எனில்,

$$\tau_{rf} = \frac{\lambda}{c} \tag{5.62}$$

என்றாகும். ஆகவே சமன் 5.61-லிருந்து,

$$\frac{\lambda}{c} = \frac{2\pi E_0}{B qc^2} \left(\frac{1}{a-b}\right)$$

$$\therefore \quad B\lambda = \frac{2\pi E_0}{B q c} \left(\frac{1}{a-b}\right) \tag{5.63}$$

மைக்ரோட்ரானின் இயக்கத்திற்குரிய அளபுருபுகளைச் சமன் 5.63-ம் 5.61-ம், குறிக்கின்றன. இவ்விரு சமன்கள் மூலமாகவும் மைக்ரோட்ரானின் இயக்கத்தை ஆராயலாம். மேலும், இப் பொறியில் இயங்கும் எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் ஈட்டம் a, b என்ற இரு முழு எண்களையும் சார்ந்துதான் மாறுமே அல்லாமல், தன்னிச்சையாக மாற முடியாதென்பதையும் உணர வேண்டும்.

ஒவ்வொரு சுற்றின் போதும் துகள் பெறும் ஆற்றல் ஈட்டம் εE_0 எனக் கண்டோம். மேலும் சமன் 5.59-ன் மூலம் ε ன் மதிப்பை நிறுவினோம். ε ஆனது நேர்க்குறி பெற்று நிலையானதொரு மதிப்பைப் பெற்றிருந்தால்தான் சீரான ஆற்றலைத் துகள் ஈட்ட முடியும். எனவே a -ன் மதிப்பு b -ஐ விட அதிகமாக இருக்க வேண்டும் என்பது தெளிவு. மேலும் a, b இரண்டுமே முழு எண் மதிப்புகளைத்தான் (*Integral Values*) பெற முடியும். ஆகவே, b -ன் சிறும மதிப்பு 1 என அமைவதால் a -ன் சிறும மதிப்பு 2 ஆகத்தான் இருக்க வேண்டும். இவ்விரு முழு எண்களின் வரம்பிற்குள்தான் ε நேர்க்குறி பெறும். ε - ன் மதிப்பு 1 ஆகவோ, அல்லது அதற்குக் குறைந்ததாகவோ இருப்பதற்கு ஏற்றவாறு a, b ஆகியவற்றின் மதிப்புகள் தேர்ந்தெடுக்கப்படலாம்.

ε -ன் மதிப்பு 1 ஆக இருக்குமானால் ஒவ்வொரு சுற்றின் போதும் எலெக்ட்ரான் பெறும் ஆற்றல் ஈட்டம் E_0 ஆகும். எலெக்ட்ரானின் ஓய்வு ஆற்றல் E_0 ஆனது ' 0·511 MeV ஆகும். முதல் சுற்றின் தொடக்கத்தில் E_0 ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரானைக் கருதுவோம். இந்த எலெக்ட்ரான் முதல் சுற்றின் முடிவில் 2 E_0 ஆற்றல் பெறும். இரண்டாம் சுற்றின் முடிவில் 3 E_0 ஆற்றல் பெற்றிருக்கும். இவ்வாறு எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் பெருகிக் கொண்டே போகும்.

எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் சுற்றுக்குச் சுற்று பெருகிக் கொண்டே போகிறது. எனவே உயர் ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரான் களை, ஏற்றதொரு ஆரமுடைய தடத்தில் இயங்க வைப்பதற்கேற்ற வாறு $B\lambda$-ன் மதிப்புப் பெரிதாக அமையவேண்டும்.

இனி $\varepsilon = \frac{E}{E_0} \leq 1$ என்ற மதிப்புடைய எலெக்ட்ரான் மைக்ரோட்ரானின் அளவுருபுகள் யாவையெனக் காண்போம்.

$$B\lambda = \frac{2\pi E_0}{qc}\left(\frac{1}{a-b}\right)$$

என்னும் கோவையில் உள்ள $\left(\frac{2\pi E_0}{qc}\right)$ என்னும் கூறு ஒரு மாறிலி யாகும். எலெக்ட்ரானின் ஓய்வு ஆற்றலையும் மின்னூட்டத்தையும், பதிலீடு செய்வோமாயின் $\left(\frac{2\pi E_0}{qc}\right)$ -ன் மதிப்பு 10,700 ஆர்ஸ்டெட் ஆகும். பின்வரும் அட்டவணையில் a, b, ε, $B\lambda$ இவற்றின் மதிப்பு களுக்கிடையே உள்ள தொடர்பைக் காணலாம்.

அட்டவணை: 5.2

a	b	ε	$B\lambda$ (ஆர்ஸ்டெட்)	a	b	ε	$B\lambda$ (ஆர்ஸ்டெட்)
2	1	1	10,700	8	1	$\frac{1}{7}$	1,528
3	1	$\frac{1}{2}$	5,350	8	2	$\frac{1}{3}$	1,783
4	1	$\frac{1}{3}$	3,567	8	3	$\frac{3}{5}$	2,140
4	2	1	5,350	8	4	1	2,675
5	1	$\frac{1}{4}$	2,675	9	1	$\frac{1}{8}$	1,337
5	2	$\frac{2}{3}$	3,567	9	2	$\frac{2}{7}$	1,528
6	1	$\frac{1}{5}$	2,140	9	3	$\frac{1}{2}$	1,783
6	2	$\frac{1}{2}$	2,675	9	4	$\frac{4}{5}$	2,140
6	3	1	3.567	10	1	$\frac{1}{9}$	1,187
7	1	$\frac{1}{6}$	1,783	10	2	$\frac{1}{4}$	1,337
7	2	$\frac{2}{5}$	2,140	10	3	$\frac{3}{7}$	1,528
7	3	$\frac{3}{4}$	2,675	10	4	$\frac{2}{3}$	1,783
				10	5	1	2,140

a-ன் மதிப்பு மிகவும் அதிகரிக்கப்படுமானால் நடைமுறையில் தோற்றுவிக்க முடியாத அளவிற்கு $B\lambda$-ன் மதிப்பு குறைந்து விடுவதை அட்டவணை 5.2-ல் காணலாம். எனவே a-ன் மதிப்பை மிகவும் அதிகமாக்குதல் கூடாது. மேலும், $a=2$ ஆகவும் $b=1$ ஆகவும், அமையும்போது $B\lambda$ -ன் மதிப்புப் பெருமத்தை அடைகின்றது என்பதையும் காணலாம். $\lambda=0{\cdot}10$ மீட்டர் ஆகவும் $B=1070$ ஆர்ஸ்டெட் ஆகவும், அமையுமானால் 29 *MeV* எலெக்ட்ரான்களுக்குரிய Br ன் மதிப்பு 98,100 ஆர்ஸ்டெட் ஆகும். எனவே, இந்த இறுதி ஆற்றலை அடையும் எலெக்ட்ரான்கள் இயங்கும் தடத்தின் ஆரம் r ஆனது $0{\cdot}917$ மீட்டர் ஆகும். $\lambda=0{\cdot}10$ மீட்டர் ஆக அமைவதிலிருந்து மைக்ரோ அலை (*Micro Wave*) அலைவான்கள் இப்பொறியில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன என்பதை அறியலாம். மைக்ரோ அலைவான்கள் தொடர்ச்சியாக ஆற்றல் தரவல்லன அல்ல. ஆதலால் இப் பொறி துடிப்பியக்கம் (*Pulsed Operation*) மூலம்தான் இயங்கும்.

5.12. மைக்ரோட்ரானின் தட ஆரம்

மைக்ரோட்ரானில் இயங்கும் துகள்களின் தட ஆரம் ஒவ்வொரு சுற்றும் முடிய முடிய அதிகரித்துக் கொண்டே போகும். எனவே, படம் 5.10-ல் உள்ளது போன்ற அமைப்புடைய தடங்கள் அமையும். இந்தத் தடங்கள் யாவும் பொதுவானதொரு தொடு கோட்டை உட்குழிவில் பெற்றிருக்கும். இத்தகையதொரு தடம் இப் பொறிக்கே உரித்தானது. இனி, இவ்விதம் உட்குழிவுக்கு எதிர்த் திசையில் அமையும் அடுத்தடுத்த தடங்களுக்கு இடையே உள்ள தூரத்தை (*Separation*)க் கணக்கிடுவோம்.

r_n -ஆரமுடைய தடத்தில் துகள் இயங்கும்போது தடச்சுற்று நேரம் τ_n எனவும், r_{n+1} ஆரமுடைய தடத்தில் இயங்கும்போது, சுற்று நேரம் τ_{n+1} என்றும் குறிப்போம். மேலும் $\tau_{n+1}-\tau_n=b\tau_{rf}$ என்றும் அறிவோம்.

சுற்று நேரம், $$\tau_n = \frac{2\pi r_n}{v_n} \tag{5.64}$$

ஆகும்.

இதைப் போலவே, சுற்றுநேரம் $$\tau_{n+1} = \frac{2\pi r_{n+1}}{v_{n+1}} \tag{5.65}$$

ஆகும்.

ஆகவே, $$\frac{2\pi r_{n+1}}{v_{n+1}} - \frac{2\pi r_n}{v_n} = b\tau_{rf} \tag{5.66}$$

$$= \frac{b\lambda}{c}$$

ஆகும். எலெக்ட்ரான்கள் ஒளியின் வேகத்தை விரைந்து நெருங்க வல்லன. ஆதலால், $v_{n+1} \approx c \approx v_n$ எனலாம்.

$$\therefore \quad 2\pi r_{n+1} - 2\pi r_n = b\lambda$$

எனவே $$D_{n+1} - D_n = \frac{b\lambda}{\pi} \tag{5.67}$$

சமன் 5.67- லிருந்து அடுத்தடுத்த இரு தடங்களுக்கு இடையில் உள்ள தூரம் (*separation*) $b\lambda/\pi$ ஆகின்றது. இந்த இடைவெளி, போதுமான மதிப்புடையதாக இருப்பதால், இறுதித்தடத்திலிருந்து எலெக்ட்ரான் கற்றையை வெளியேற்றுவது எளிமையாக அமையும் (படம் 5.10).

5.13. மைக்ரோட்ரானில் நிலைப்பாடு (Stability In Microtron)

காந்தப்புலம் சீரானதாக இருக்குமெனில் புலஎண் 'n' சுழியம் என்றறிவோம். எனவே, மைக்ரோட்ரானில் இயங்கும் துகளானது

ஆயத்திசையில் குவிக்கின்ற விசையை உணராது. எனவே, மின்புலம் குறையத் (*Decreasing*) தொடங்கும் தருணத்தில் உட்குழிவை அணுகும்போது மட்டுமே துகள் குவிக்கும் விசையை உணரும். இந்தக் குவிக்கும் விசையால் மட்டுமே நிலைப்பாடு நிலவும். ஆனால் பொறி முழுவதுமே காந்தப்புலம் ஒரு சீராக இருப்பதாகக் கூறிவிடமுடியாது. துருவ விளிம்புகளின் அருகில் ஒத்திசைவு உட்குழிவு உள்ளது. இங்கு புலம் சீரற்று இருப்பதால், ஒவ்வொரு சுற்றிலும் துகள் மீட்பு விசையொன்றை உணரும். இருப்பினும், துகளின் தடத்தில் பெரும்பகுதி சீரான காந்தப்புலத்திற்கு உள்ளேயே அமைந்து விடுவதால், முன்னர் கண்டவாறு மின்புலத்தால் நிலவும் குவிக்கும் விசையே நிலைப்பாட்டைத் தோற்றுவிக்கும்.

இப் பொறியில் இயங்கும் துகள்கள் அடையும் கலைக்கோணப் பெயர்ச்சி (*Phase Shift*) மிகச் சிறியதாகவே இருக்கும். மைக்ரோட்ரானில், துகள்கள் ஒரு சில சுற்றுகளே இயங்குவதால் கருதக்கூடிய அளவிற்குக் கலைக்கோணப் பெயர்ச்சி ஏற்படாது. மேலும், மத்திய தளத்தை விட்டுச் சிறிதே விலகிப் போகும் துகள்கள் ஆரத்திசையில் குவிதல் இல்லாக் காரணத்தால் தவறிப் போகா. ஆனால் மத்திய தளத்தை விட்டுப் பெரிதும் விலகும் துகள்களோ தவறிப் போகும். இந்தக் காரணங்களால் மைக்ரோட்ரானில் ஆற்றல் பெற்று வெளிவரும் எலெக்ட்ரான் கற்றையின் செறிவு குறைந்திருக்கும். அதாவது உட்குழிவின் ஊடேயுள்ள குவிக்கும் விசை போதுமானதாக இல்லாததாலும், சீரான காந்தப்புலம் ஆயத்திசையில் குவிதலைத் தடுப்பதாலும், மைக்ரோட்ரானில் இயங்கும் துகள் கற்றையை, இழப்பின்றிக் காப்பது அரிதாகும். எனவே, இப் பொறியில் காந்தமானது துல்லியமாக அமைக்கப்பட வேண்டும்.

மைக்ரோட்ரானில் இயங்கும் துகள்கள், உரிய ஆற்றலை ஈட்டக் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவவேண்டும். நிலைப்பாடு நிலவ, உரியக் கலைக்கோணத்தில் எலெக்ட்ரான்கள் ஒத்திசைவு உட்குழிவை அணுக வேண்டும். q - மின்னூட்டமுடைய எலெக்ட்ரான் ஒன்று ϕ கலைக் கோணத்துடன், உட்குழிவில் V மின்னழுத்தத்தைச் சந்திக்குமெனில் அது பெறும் ஆற்றல் ஈட்டம் $qVSin\phi$ ஆகும். அதாவது,

$$\varepsilon E_0 = qVSin\phi \qquad (5.68)$$

எனவே, சமன் 5.59 லிருந்து,

$$\frac{qVSin\phi}{E_0} = \frac{b}{a-b}$$

ஆகும்.

$$\therefore V \, Sin\phi = \frac{E_0}{q} \left(\frac{b}{a-b}\right) \quad (5.69)$$

ஆகும். சமன் 5.69 குறிக்கும் மைக்ரோட்ரானின் இசைவு கலைக் கோணம், நிலைப்பாடு பெற வேண்டுமெனில், குறையத் தொடங்கும் (*Decreasing*) மின்புலத்தைத் துகள் நாடவேண்டும். எனவே, ϕ-ஆனது $\pi/2$-க்கும் π - க்கும் இடையில் அமைய வேண்டும்.

5.14. துகளின் இறுதி ஆற்றல்

மைக்ரோட்ரானில், துகளின் இறுதி ஆற்றலைப் பெருக்க மற்றொரு முறையைக் கையாளலாம். மைக்ரோட்ரானுள் செலுத்தப்படும் எலெக்ட்ரான்கள் தொடக்கத்திலேயே T_0 இயக்க ஆற்றல் பெற்றிருப் பதாகக் கருதுவோம். எனவே சமன் 5.69 - ல் E_0க்குப் பதிலாக (E_0+T_0) - ஐப் பயன்படுத்த வேண்டும். எனவே, நிலைப்பாடு நிலவ வேண்டுமெனில் இதற்கு ஏற்ற வகையில் காந்தப்புலம் B-ன் மதிப்பை மாற்ற வேண்டும். காட்டாக E_0 ஓய்வு நிலை ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரான்களை kE_0 இயக்க ஆற்றலுடன் மைக்ரோட்ரானில் உட் செலுத்துவதாகக் கொள்வோம். எனவே ஒரு சுற்றின் முடிவில் எலெக்ட்ரான் பெறும் ஆற்றல் E_1 எனில்,

$$E_1 = (E_0+kE_0) + \varepsilon E_0 \quad (5.70)$$

ஆகும். ஆகவே, நாம் முன்னர் தருவித்த சமன். 5.48 ஐ

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{Bqc^2}(E_0+kE_0+\varepsilon E_0)$$

என்று எழுதலாம்.

அல்லது,
$$\tau_1 = \frac{2\pi}{Bqc^2}E_0\,(1+k+\varepsilon) \quad (5.71)$$

ஆகும். எனவே, சமன் 5.50 - லிருந்து

$$\frac{2\pi E_0}{Bqc^2}(1+k+\varepsilon) = a\,\tau_{rf} \quad (5.72)$$

ஆகும். இதைப் போலவே,

$$\tau_2 = \frac{2\pi E_0}{Bqc^2}(1+k+2\varepsilon) \quad (5.73)$$

ஆகும்.

சமன்கள் 5.71, 5.73 –லிருந்து,

$$(\tau_2 - \tau_1) = \frac{2\pi E_0}{B\,q\,c^2}\,\varepsilon \quad (5.74)$$

ஆகும்.

இனி சமன்கள் 5.58, 5.72 லிருந்து,

$$\frac{2\pi E_0}{Bqc^2}\;\frac{(1+k+\varepsilon)}{a}=\frac{2\pi E_0}{Bqc^2}\frac{\varepsilon}{b} \tag{5.75}$$

ஆகும்.

சமன் 5.73ஐச் சமன் 5.51 உடன் ஒப்பிடுவோமானால் kE_0 இயக்க ஆற்றலுடன் துகள்களைச் செலுத்துவோமெனில், N சுற்றுகளுக்குப் பின்னால் $(kE_0+N\varepsilon E_0)$ இயக்க ஆற்றலோடு அவை வெளிவரும் என்பதை அறியலாம். ஆகவே ஓய்வுநிலையில் இருக்கும் எலெக்ட்ரானை உட்செலுத்திப் பெறுகின்ற ஆற்றலைக் காட்டிலும், ஓரளவு இயக்க ஆற்றல் உடைய எலெக்ட்ரானை உட்செலுத்தி மிகுந்த ஆற்றல் பெறலாம் என்பது தெளிவாகும்.

இனிச் சமன் 5.75 லிருந்து ε -ன் மதிப்பை நிறுவலாம்.

$$(1+k+\varepsilon)=\left(\frac{a}{b}\right)\varepsilon$$

ஆதலால்,
$$(1+k)=\left(\frac{a}{b}-1\right)\varepsilon$$

ஆகும். அல்லது,
$$\varepsilon=\left\{\frac{(1+k)b}{(a-b)}\right\} \tag{5.76}$$

ஆகும். இதனால்,
$$\frac{2\pi E_0}{Bqc^2}\;\frac{(1+k)b}{(a-b)}=b\,\tau_{rf} \tag{5.77}$$

எனப் பெறலாம்.

அல்லது,
$$\frac{2\pi E_0}{Bqc^2}\;\frac{(1+k)}{(a-b)}=\tau_{rf}$$
$$=\lambda/c$$

$$\therefore\quad\left\{\frac{2\pi E_0}{qc}\;\frac{(1+k)}{(a-b)}\right\}=B\lambda \tag{5.78}$$

துகள்களைக் குறிப்பிட்டதோர் அளவு இயக்க ஆற்றல் பெறச் செய்து, பின்னர் உட்செலுத்துவதெனில், அதற்கேற்றவாறு அமைய வேண்டிய காந்தப்புலமதிப்பைச் சமன் 5.78 நிறுவுகின்றது. இவ்வாறு பொறியினுள் செலுத்தப்படும் எலெக்ட்ரான்களின் தொடக்க ஆற்றலை உரிய முறையில் அமைப்பதன் மூலம் தேவையான அளவிற்கு இறுதி ஆற்றலை அடைய முடியும் என்பது பெறப்படும்.

5.15. குறிப்பிடத்தக்க மைக்ரோட்ரான்கள்

வெக்சலரின் கொள்கையால் ஊக்கமடைந்த அறிவியலாளர்கள் மைக்ரோட்ரானை அமைக்க முயன்றனர். 1948 -ல் ஒட்டவாவில்

(Ottavo) 5 *MeV* மைக்ரோட்ரான் அமைக்கப்பட்டது. *U. S. A* -ல் 1951 ல் கெய்ஸெர் *(Keiser)* என்பாரால் 6 *MeV* மைக்ரோட்ரான் அமைக்கப்பட்டது. கெய்ஸெர் மைக்ரோட்ரானை உயர் ஆற்றல் முடுக்கிகளில் உட்செலுத்தியாகப் பயன்படுத்தும் விதம் பற்றி ஆராய்ந்தார். வெர்ன் ஹோல்ம் *(Wernholm)* என்பார் ஸ்வீடனில் அமைத்த 5·9 *MeV* மைக்ரோட்ரான், இருவாட்டந்தரு *(Alternating Gradient)* எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரானில், உட்செலுத்தியாகப் பயன்பட்டது.

இப் பொறியில் ஆரத்திசையில் குவிப்பு இல்லாத காரணத்தால், ஆற்றல் பெற்று வெளிவரும் கற்றை செறிவு குறைந்ததாக இருக்கும். எலெக்ட்ரான் வாய்களை உரிய முறையில் அமைத்து, எலெக்ட்ரான்களைத் தக்க முறையில் செலுத்துவதன் மூலம் செறிவை அதிகமாக்கலாம். இந்தப் பொறியிலிருந்து பெறக்கூடிய பெரும ஆற்றல் 10 முதல் 20 *MeV* ஆகும்.

5.16. முடிவுரை

காந்த ஒத்திசைவுத் தத்துவம் செயல்பட்ட, லாரன்சின் கனவு தந்த பொறியான சைக்ளோட்ரானின் அமைப்பையும் இயக்கத்தையும் ஆராய்ந்தோம். காந்த ஒத்திசைவு நிறைவுபெற அலைவானின் அலைவு நேரம் திருத்தப்பட வேண்டிய விதம் குறித்தும் விளக்கம் பெறப்பட்டது.

சுருள் பாதையில் இயங்கும் துகள்களை, விலக்கிமேல் மோதாமல் வெளியேற்ற, அடுத்தடுத்த தடங்களுக்கிடையேயான தூரத்தின் பெரும மதிப்பு கணிக்கப்பட்டது. எல்லா வகையான கலைக்கோணங்களும் உடைய துகள்கள் அயனிவாயிலிருந்து வெளிவருமாதலால் துகள்கற்றை உரிய ஆற்றல் பெற கலைக்கோண நெடுக்கம் தீர்மானிக்கப்பட வேண்டும் எனவும், இந்தப் பயனுள்ள கலைக்கோண எல்லை பரந்து நிற்க அலைவானின் அதிர்வெண் ω_{rf} அமைய வேண்டிய நியதி குறித்தும் முடிவுகள் பெறப்பட்டன.

துகள்கள் பெறக்கூடிய பெரும ஆற்றலானது காந்தப்புல மதிப்பையும், துகள்களின் ஓய்வுநிலை நிறையையும் சார்ந்துள்ளது என்பதும், காந்தப்புல அமைப்பிற்கேற்ப விளங்கும் மீட்பு விசையால் துகள்களின் இயக்கம் அமையும் விதமும் அறியப்பட்டன.

எலெக்ட்ரானை முடுக்குவதற்குச் சைக்ளோட்ரான் பயன்படுத்துவதில்லை. ஆதலால், அதைச் சீரமைத்துப் பிறந்த மைக்ரோட்ரானின் அமைப்பும் இயக்கமும் ஆராயப்பட்டன.

பெரு வேகங்களில் இயங்கும் நேர்மின்னூட்டத் துகள்களும் சார்பியல் கொள்கைப்படி இயங்குமாதலால், சைக்ளோட்ரான் இயக்கத்தில் சில மாறுதல்கள் தோன்றின. இதன் பயனாகச் சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான் *(Synchro Cyclotron)* என்ற பொறி உருவாக்கப்பட்டது.

6. கருத் தூர்ந்த பொறிகள்

6.1 முன்னுரை

சார்பியல் கொள்கைப்படி வேகத்திற் கேற்றவாறு துகளின் நிறை மாறலாம் என அறிவோம். இதனுல் சைக்ளோட்ரான்களில் காந்தத்தின் விட்டத்தை 1·524 மீட்டருக்கு மேல் அதிகரிக்க முடியாமற் போயிற்று. தவிர, புரோட்டான், டாய்ட்ரான் போன்ற துகள்களை 25 MeVக்கு மேல் ஆற்றல் பெறச் செய்ய இயலாமலும் போயிற்று. இத்தகு தடைகளை உடைத்தெறிந்து சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான் எனப்படும் பொறி பிறந்தது.

சைக்ளோட்ரானில் D-க்களுக்கிடையே செயல்படும், அலையும் மின்புலத்தின் அதிர்வெண் நிலையானதாக இருக்கும் எனக்கண்டோம். ஆனுல், இந்த சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானிலோ மின்புலத்தின் அதிர்வெண் மாறிக்கொண்டே இருக்கும். சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் q மின்னூட்டமும் M நிறையுமுடைய துகளொன்றின் சுற்று அதிர்வெண் $f = \omega/2\pi$ என்றறிவோம். அதாவது,

$$f = \frac{qB}{2\pi M} \tag{6.1}$$

சார்பியல் கொள்கைப்படி துகளியங்கும்போது, நிறையில் ஏற்படும் மாற்றத்தால் துகளின் அதிர்வெண்ணும் மாறும் என்பதைச் சமன் 6.1 கூறும். மேலும், சைக்ளோட்ரானில் சுருள் பாதையொன்றில் துகள் இயங்கும் என்றும் அறிவோம். இதனுல் துகளின் ஆற்றல் பெருகப் பெருக அதன் தடஆரம் அதிகரிக்கும் எனவும் கண்டோம். சைக்ளோட்ரான் போன்ற மென் குவிப்புப் பொறிகளில் துகளின் தடம் நிலைப்பாடு அடைய வேண்டுமெனில் காந்தப்புலம் ஆரத் திசையில் குறையவேண்டும் எனவும் கண்டோம். ஆகவே, துகளின் ஆற்றல்பெருகப் பெருக, அது இயங்கும் பாதையிலுள்ள காந்தப்புல

மதிப்பு B-ம் குறையத் தொடங்கும். இந்தக் காரணத்தாலும் துகளின் ஆற்றல் பெருகப் பெருக அதன் அதிர்வெண் 'f' குறையும் என்பதைச் சமன் 6.1 - லிருந்து அறியலாம்.

சைக்ளோட்ரானில் துகள் இயங்கத் தொடங்கும் போது துகளின் தடச்சுற்று அதிர்வெண்ணையும் மின்புல அதிர்வெண்ணையும் இசைவுறுமாறு செய்தோம். இப்பொழுதோ நிறையில் ஏற்பட்ட அதிகரிப்பாலும், காந்தப்புல மாற்றத்தாலும் துகளின் சுற்று அதிர்வெண். அலைவானின் அதிர்வெண்ணுடன் இசைவு பெறுது. இந்த ஒத்திசைவு பிறழ்ந்த நிலையினுல் துகளின் இயக்கம் தடைபடும். இதன் பயனுகக் குறிப்பிட்டதொரு ஆற்றல் வரம்புக்குமேல் சைக்ளோட்ரானில் துகளை முடுக்க முடியாது என்பது தெளிவாகும். எனவே அறிவியலார்கள் வேறு உத்திகளைக் கையாள எண்ணினர்.

பொறியின் மையத்திலுள்ள அயனி வாயிலிருந்து வெளிவரும் அயனிகளின் ஆற்றல் பெருகப் பெருக அவற்றின் அதிர்வெண்களில் மாற்றம் ஏற்படும் அல்லவா? இம் மாற்றங்களுக்கேற்ப அலைவானின் அதிர்வெண்ணையும் மாற்றிக்கொண்டே வந்தால் இசைவு நிறைவு பெறச் செய்யலாம் என்ற கருத்தை விஞ்ஞானிகள் கூறினர். இந்தக் கருத்துச் செயல்படும் பொறி சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான் எனப்படும் கருத்தூர்ந்த பொறியாகும்.

அயனிவாயிலிருந்து வெளிவரும் அயனிகள் யாவுமே ஒரே மதிப்பு உடைய அதிர்வெண்கள் பெற்றிருக்கமாட்டா. எனவே எல்லாத் துகள்களின் அதிர்வெண்களும் ரேடியோ அதிர்வெண்ணுடன் இசையா. வெக்சலர் - மாக்மில்லனின் கலைக்கோண நிலைப்பாடு தத்துவம் இவ்விடர்பாடு நீங்கத் துணை செய்கிறது. கலைக்கோண நிலைப்பாட்டுத் தத்துவம் பிறந்தவுடன் பெர்க்கிலியில் உள்ள சைக்ளோட்ரானில் அது செயல்படுத்தப்பட்டு, சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான் உருவாக்கப்பட்டது.

இவ்வாறு அமைக்கப்பட்ட சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானின் அமைப்பையும் செயல்படு விதத்தையும் குறித்து இந்த அத்தியாயத்தில் காண்போம். முதலில், துகள்கள் பெறக்கூடிய பெரும ஆற்றலானது எவ்வாறு காந்தப் புலத்தைச் சார்ந்திருக்கும் என்பது ஆராயப்படும். மேலும், அக் காந்தப்புலப் பெரும மதிப்பானது எந்தெந்தக் காரணங்களால் கட்டுப்படுத்தப்படுகிறது என்பதும் கருதப்படும்.

இப் பொறியுள் இயங்கும் எல்லாவகையான துகள்களும் சீரான ஆற்றல் பெறக் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவவேண்டும். கலைக்கோண நிலைப்பாடு பெற எல்லாத் துகள்களும் கலைக்கோண அலைவுகளுக்கு

உட்படுமாதலால், அக் கலைக்கோண அலைவுகள் குறித்துத் தெளிவான தொரு விளக்கம் பெற ஒப்புமையொன்றும் கருதப்பெறும். அந்த ஒப்புமையில் இருந்து தொடக்கக் கலைக்கோண மதிப்புகள் நிறுவப்படும்.

பின்னர் சைக்ளோட்ரானுக்கும் சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானுக்கும் உள்ள சில முக்கிய வேறுபாடுகள் குறித்தும், சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானுக்கே உரிய சில சிறப்பியல்புகள் குறித்தும் விளக்கம் கூறப்படும். சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகள் கற்றையை வெளியேற்றுதல் அரியதொரு செயலாகும். எனவே, அதுபற்றியும் பேசப்படும்.

6.2. அமைப்பும் இயக்கமும்

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானின் அமைப்பும் சைக்ளோட்ரானைப் போன்றதேயாகும். ஆனால் நாம் முன்னர் கண்டவாறு, சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில், மின்னழுத்த அதிர்வெண் மாறிலியாக இல்லை. சைக்ளோட்ரானில், எறிபொருள் பாதை முழுதும் துகள்கள் பரவியிருப்பதுபோல் சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் பரவியிருக்கா. அயனி வாயிலிருந்து வெளிவரும் துகள்கள் தனிக் கொத்தாக இறுக்கமானதொரு சுருள்பாதையில் அதிகரிக்கின்ற வேகத்துடன் இயங்கும். அதிர்வெண் பண்பேற்ற வீதத்திற்கு (*Rate of Frequency Modulation*) ஏற்ப, கொத்தாகத் துகள்கள் மையத்திலிருந்து வெளிவரும். இதனால், ஆற்றல் பெற்று வெளிவரும் கற்றையும் அதே துடிப்புடன் வெளிவரும். எனவே, சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் உள்ள துகள்கற்றையின் செறிவு மெலிந்திருக்கும். துகள்கள் பல்லாயிரக் கணக்கில் சுற்றுகளை மேற்கொள்ளுவதற்கேற்ப குறைந்த அளவு மின்னழுத்தமே இந்தப் பொறியில் பயன்படுத்தப்படுகின்றது, சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானுக்குப் பெரும்பாலும் $10kV$ மின்னழுத்தமே போதுமானது.

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில், சுருள் பாதையில் இயங்கும் துகள்கள் முடுக்கந்தரும் இடைவெளியைப் பலமுறை நாடுகின்றன. ஒவ்வொருமுறை நாடும் போதும் அதே கலைக்கோணத்தில் மின் புலத்தைச் சந்திக்கும் துகளை இசைவுறு துகள் எனவும், பிற துகள்களை இசைவுறாத் துகள்கள் எனவும் குறித்தோம். மேலும் ஒவ்வொரு தருணத்திலும் இசைவுறு துகளின் ரேடியன் அதிர்வெண்ணும் அலைவானின் ரேடியன் அதிர்வெண்ணும், ஒரே மதிப்புடையதாக அமைய வேண்டும் எனவும் அறிவோம்.

துகளின் கோண அதிர்வெண்,

$$\omega = \frac{qBc^2}{(T+E_0)} \qquad (6.2)$$

ஆதலால்,

அதிர்வெண், $f = \frac{\omega}{2\pi}$

$$= \frac{qBc^2}{2\pi E_0(1+T/E_0)} \qquad (6.3)$$

ஆகும். சமன் 6.3 -ல் உள்ள B யை வெபர்/மீட்டர்^{2}-லும், f-ஐ மெகாஹெர்ட்ஸிலும் குறிப்போமெனில், புரோட்டான்களுக்குரிய அதிர்வெண்,

$$f = \frac{1{\cdot}52B}{(1+T/E_0)} \qquad (6.4)$$

எனப் பெறலாம். நிலைத்த அதிர்வெண் சைக்ளோட்ரானிலோ புரோட்டானுக்குரிய அதிர்வெண் 1·52 B ஆகும். எனவே, சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகளின் இயல்பு, சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகளின் இயல்பிலிருந்து வேறுபட்டு இருப்பதை உணரலாம். அதாவது சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் உள்ள அதிர்வெண் எல்லையானது, துகளின் இயக்க ஆற்றல் T - ஐயும், இறுதி ஆரத்திலுள்ள காந்தப்புல மதிப்பையும் சார்ந்திருக்கும். பெர்க்கிலி *(Berkeley)*-யில் உள்ள சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் B-ன் மதிப்பு 2·33 வெபர்/மீட்டர்^{2} - லிருந்து 2·275 வெபர்/மீட்டர்^{2} வரை மாறுபடும். இதில் புரோட்டான்கள் முடுக்கப்பட்டு 730 *MeV* ஆற்றல் பெறுகின்றன. அலைவான் அதிர்வெண் 35·4 முதல் 19·1 மெகா ஹெர்ட்ஸ் வரை பண்பேற்றச் *(Modulation)* சீரமைப்புப் பெறுகின்றது.

இனி, முடுக்கப்படும் துகள்களாக டாய்ட்ரான்கள் இருக்குமானல்

அதிர்வெண், $$f = \frac{0{\cdot}76\ B}{(1+T/E_0)} \qquad (6.5)$$

என்றாகும். பெர்க்கிலியிலுள்ள சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் B-ன் மதிப்பு 2·33 வெபர்/மீட்டர்^{2} - லிருந்து 2·275 வெபர்/மீட்டர்^{2} வரை மாறுபடும். அலைவான் 17·7 லிருந்து 13·6 மெகா ஹெர்ட்ஸ் வரை பண்பேற்றச் சீரமைப்பு பெறுகின்றது. எனவே, இந்தப் பொறியில் இயங்கும் துகளின் இறுதி ஆற்றலுக்கு ஏற்றவாறு அலைவானின் அதிர்வெண் அமையும் என்பதை உணரலாம்.

6.3. காந்தப்புல அமைப்பு

இனி, இப்பொறியில் அமையும் காந்தப்புல அமைப்பைக் காணலாம். ஓய்வு நிலை ஆற்றல் E_0-ம் மின்னூட்டம் q-ம் உடைய துகளொன்று 'v' வேகமுடன் இயங்குவதாகக் கருதுவோம். எனவே,

$$\frac{(E^2 - E_0^2)^{\frac{1}{2}}}{c} = Mv$$

என்றறிவோம். ஆனால், $E = T + E_0$ ஆதலால்,

$$\frac{\left\{T\,(T+2E_0)\right\}^{\frac{1}{2}}}{c} = Mv \tag{6.6}$$

ஆகும்.

செயல்படும் காந்தப்புலம் B-ஐ, ஆயத்திசைக்கு இணையாகவும் ஆரத்திசைக்கு இணையாகவும் இரு கூறுகளாகப் பகுக்கலாம். ஆயத்திசைக்கூறு B_z எனில்,

$$Mv = B_z\, qr$$

என்றாகும்.

$$\therefore\ r = \frac{Mv}{B_z q}$$

அல்லது,

$$r = \frac{\left\{T\,(T+2E_0)\right\}^{\frac{1}{2}}}{q\ c\ B_z} \tag{6.7}$$

ஆகும்.

ஆகவே,

$$T^2 + 2TE_0 = c^2 q^2 B_z^2 r^2 \tag{6.8}$$

ஆகும். சமன் 6.8-லிருந்து, துகள் அடையும் இறுதி ஆற்றல், பெரும ஆரத்தில் (r) உள்ள காந்தப்புலத்தைச் சார்ந்திருப்பது புலனாகும். இதனால், காந்தப்புல மதிப்பைக் கொண்டு துகளின் ஆற்றலைப் பெருக்க முடியும் என்று அறியலாம். 1·8 வெபர்/மீட்டர்^{2} - லிருந்து 2·0 வெபர்/மீட்டர்^{2} அளவுகளில் காந்தப்புல பெரும மதிப்பானது காந்த உட்புகுதிறனால் (*Permeability*) கட்டுப்படுத்தப்படுகின்றது. மேலும், காந்தம் தெவிட்டு நிலையை அடையாத வரைதான் B-ஐ அதிகரிக்க முடியும். அன்றியும், குவித்தலுக்குத் (*Focussing*) தேவையான விதிகளின் காரணமாகப் பெருமத்தட ஆரத்தில் உள்ள புலம் குறைக்கப்படவேண்டும் என்பதையும் கருதவேண்டும். எனவே, மேல் சொன்ன மூன்று காரணங்களாலும் காந்தப்புல மதிப்பைக் குறிப்பிட்டதொரு வரம்பிற்குமேல் அதிகரிக்க முடியாது என்பது புலனாகும்.

இவ் வரம்புகளுக்கு உட்பட்டு, பெரும் விட்டங்களை உடைய காந்தங்களைப் பயன்படுத்தினுல் ஆற்றலைப் பெருக்க முடியும் என்பதை, சமன் 6.8-லிருந்து அறியலாம். எனவே, சில வரம்புகளுக்குள் கட்டுப்பட வேண்டிய காரணத்தால் சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானின் இறுதி ஆற்றலும் கட்டுப்படுகின்றது. இப் பொறி தரவல்ல ஆற்றல் 1 BeV ஆக அமைகின்றது. காட்டாக, பெர்க்கிலியில் உள்ள சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானைக் கருதினுல், இது தரக்கூடிய பெரும ஆற்றல் 720 MeV ஆகும்.

6.4. கலைக்கோண நிலைப்பாடு

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு குறித்துத் தெளிவான விளக்கம் பெற, இசைவுறு துகளின் துணையை நாடலாம். இசைவுறு துகளின் கலைக்கோணம் ϕ_s, கோணத்திசை வேகம் $\omega_s(t)$ எனவும், இசைவுறுத்துகளின் கலைக்கோணம் ϕ, கோணத்திசை வேகம் ω எனவும் குறிப்போம். இசைவு நிலவ வேண்டுமெனில், ரேடியோ அதிர்வெண் $f = \omega_s(t)/2\pi$ என்னும் தொடர்பு நிறைவு பெற வேண்டும். ரேடியோ அதிர்வெண், காலத்தையொட்டி மாறவல்லது ஆதலால், D-க்களுக்கிடையே செலுத்தப்படும் மாறுமின்னழுத்தத்தை V பெருமம் $Sin\left(\int_0^t \omega_s\, dt\right)$ என்று குறிக்கலாம். ஆகவே, முடுக்கந்தரு இடைவெளியை அணுகும்போதெல்லாம் துகள் ஈட்டும் ஆற்றல் $q\,V$ பெருமம் $Sin\phi_s$ என்ருகும். துகள் ஒரு சுற்றை முடிக்கும்போது Dக்களுக்கு இடையே உள்ள வெளியை இருமுறை நாடியிருக்கும். இதன் பயனுக, துகள், ஒரு சுற்றில் ஈட்டும் ஆற்றல் $2q\,V$ பெருமம் $Sin\phi_s$ ஆகும். இதைப் போலவே இசைவுறுத் துகள் ஒரு சுற்றில் அடையும் ஆற்றல் $2q\,V$ பெருமம் $Sin\phi$ ஆகும்.

கலைக்கோணங்கள் ϕ_s-ஐயும், ϕ-ஐயும், மின்புலமானது முடுக்கத் தன்மையிலிருந்து எதிர்முடுக்கத் தன்மையை நாடிச் செல்கையில், சுழியத்தை கடக்கும் கணத்திலிருந்து அளக்கலாம். t- கணத்தில் இசைவுறு துகளின் ஆற்றலையே பெற்றிருக்கும் இசைவுறுத் துகளொன்றைக் கருதுவோம். இத் தருணத்தில் இத் துகள்களின் ஆற்றல்கள் சமமாக இருந்தாலும், அவற்றின் கலைக்கோணங்கள் வெவ்வேறு மதிப்புடையதாக அமையும். இசைவுறுத் துகளின் கலைக்கோணம் $\phi > \phi_s$ என்று கொள்வோம். எனவே, இவ்விரு துகள்களும் முடுக்கந்தரு இடைவெளியை வெவ்வேறு கலைக்கோணத்தில் நாடும். மேலும், இந்த இசைவுறுத்துகள் இசைவுறு துகளைவிட அதிக ஆற்றலை ஈட்டும்.

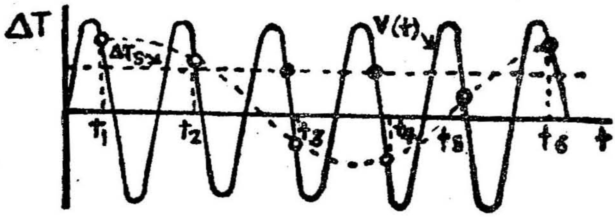
இசைவுறு துகளின் மொத்த ஆற்றல் E_s, இசைவுறாத் துகளின் மொத்த ஆற்றல் E எனில், $E > E_s$ ஆகும். மேலும், இசைவுறு துகளின் கோண அதிர்வெண்

$$\omega_s = \frac{qBc^2}{E_s} \quad (6.9)$$

இசைவுறாத் துகளின் கோண அதிர்வெண்

$$\omega = \frac{qBc^2}{E} \quad (6.10)$$

ஆதலால், சமன்கள் 6.9, 6.10-லிருந்து இசைவுறாத் துகளின் கோணத்திசை வேகம் $\omega < \omega_s$ என அறியலாம். இந்தக் காரணத்தால், இசைவுறாத் துகள் இரண்டாம் சுற்றை முடிக்க, இசைவுறு துகளைவிட அதிகநேரம் எடுத்துக் கொள்ளும். எனவே, இரண்டாம் முறை இடைவெளியை t_2 கணத்தில் அடையும் (படம் 6.1). t_2 கணத்தில் அமையும் முடுக்கும் மின்னழுத்த மதிப்பு t_1 கணத்தில் உள்ளதைவிடக் குறைவாகும். இப்பொழுது ϕ_2 கலைக்கோணத்துடன் இசைவுறாத்துகள்



படம் 6.1 சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் கலைக்கோண நிலைப்பாடு

இடைவெளியை நாடும். $\phi_1 > \phi_2 > \phi_s$ ஆதலால் இசைவுறாத் துகளானது மேலும் தன் ஆற்றலைப் பெருக்கிக் கொள்ளும். எனவே, E-ன் மதிப்பு E_s-ஐ விட மேலும் அதிகரிக்கும். இவ்வாறாக, ஒவ்வொரு முறை முடுக்கச் சாதனத்தை நாடும்போதும் இசைவுறாத்துகளின் ஆற்றல் பெருகிக்கொண்டே வருவதுடன், அதன் கலைக்கோணமும் குறைந்துகொண்டே வரும். எனவே, குறிப்பிட்டதொரு நிலையில், அதன் கலைக்கோணம் இசைவுறு துகளின் கலைக்கோணத்திற்குச் சமமாகும் ($\phi \equiv \phi_s$).

இவ்விதம், இசைவுறாத்துகளின் கலைக்கோணம் இசைவுறுதுகளின் கலைக்கோணத்துடன் சமமானாலும் $E > E_s$ என்றே அமைந்திருக்கும். எனவே, அடுத்துவரும் சுற்றுகளில் இசைவுறாத்துகளின் கலைக்கோணம் ϕ-ஆனது ϕ_s-ஐவிடக் குறைந்துவிடும். ஆகவே, முடுக்கச் சாதனத்தை அணுகும் இசைவுறாத்துகள் ஆற்றலை இழக்கத் தொடங்கும். இவ்விதம் இசைவுறாத் துகளின் ஆற்றல் குறைந்து கொண்டே வந்து, ஒருசில சுற்றுகளுக்குப் பின்னால் $E = E_s$ என்றாகும். எனவே, தொடக்கத்தில் அமைந்தபடி இசைவுறாத்துகளின் ஆற்றல் இசைவுறு

துகளின் ஆற்றலுக்குச் சமமானது. ஆகவே, இசைவுறுத்துகள் மீண்டும் தன் பயணத்தைத் தொடருமெனில் மீண்டும் $E>E_s$ ஆகி, கலைக்கோணம் ϕ திரும்பவும் அதிகரிக்கத் தொடங்கும். ϕ -ஆனது ϕ_s -ஐ அணுகும் வரை இத்தகு ஆற்றல் மாற்றங்கள் நிலவும். விளங்கச் சொன்னுல், துகளானது இசைவு ஆற்றலை (*Synchronous Energy*) ஒட்டிய ஆற்றல் அலைவுகளுக்கும் (*Energy Oscillations*) இசைவு கலைக்கோணத்தை ஒட்டிய கலைக்கோண அலைவுகளுக்கும் (*Phase Oscillations*) ஆளாகின்றது எனலாம். இந்த அலைவுகள் சிங்க்ரோட்ரான் அலைவுகள் எனப்படும். வெக்சலர், மாக்மில்லனுல் முன்மொழியப்பட்ட கலைக்கோண நிலைப்பாட்டுத் தத்துவம் துகள்களின் ஆற்றல் பகிர்வு (*Energy Distribution*) சீர்மையுற வழி செய்தது.

6.5. கலைக்கோண அளவுகள்

இனி, கலைக்கோண நிலைப்பாடு பற்றித் தெளிவானதொரு விளக்கம் பெறுவோம். துகள்கள் நிலைப்பாடு அடைந்து சீரான ஆற்றல்பெற தொடக்க கலைக்கோணம் எவ்வாறு அமையவேண்டும் என்பதை இனிப் பெறுவோம். முடுக்கும் மின்னழுத்தம் சுழிய மதிப்பை அடையும்போது, துகளின் கலைக்கோணம், முடுக்கந்தரு இடைவெளி சார்ந்த திசைக் கோணத்துடன் (*Azimuthal Angle*) பொருந்தும். dt நேரங்கழித்து நோக்கும்போது முடுக்கும் மின்னழுத்த மதிப்பு மாறியிருக்கும். இதனுல், மின்னழுத்தத்தின் கலைக்கோணமும் மாறி யிருக்கும். ஆகவே, மின்னழுத்தத்துடன் இசைவு பெற்றிருக்கும் இசைவுறு துகளின் திசைக்கோணமும் அதே அளவு மாறியிருக்கும். இசைவுறு துகளின் திசைக்கோண மாறுபாடு $\omega_s dt$ எனலாம். இதே நேரத்தில் இசைவுறுத் துகளின் திசைக்கோணமும் மாறுபாடு அடைந் திருக்கும். இசைவுறுத்துகளின் கோண மாறுபாட்டை ωdt எனக் குறிப்போம்.

எனவே, கலைக்கோண மாறுபாடு $d\phi$ -ஐ

$$d\phi = (\omega - \omega_s)dt \tag{6.11}$$

என்று எழுதலாம்.

எனவே,

$$\frac{d\phi}{dt} = (\omega - \omega_s) \tag{6.12}$$

ஆகும். திசைக்கோணம் θ -ஐக் கருதுவோமாயின்,

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{dt}{d\theta}\frac{d\phi}{dt} \tag{6.13}$$

எனப் பெறலாம்.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

ஆதலால்,

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{1}{\omega}(\omega - \omega_s) \qquad (6.14)$$

என்றாகும்.

அல்லது,

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \left(1 - \frac{\omega_s}{\omega}\right) \qquad (6.15)$$

சமன்கள் 6.9, 6.10 -லிருந்து சமன் 6.15 -ஐ

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \left(1 - \frac{E}{E_s}\right) \qquad (6.16)$$

என்று எழுதலாம்.

துகள் முழுச் சுற்றொன்றில் ஈட்டுகின்ற ஆற்றல் $E = 2qV$ பெருமம் $Sin\phi$ என்றறிவோம். ஆற்றல் E-யை 2π ஆல் வகுப்போமெனில், ஓரலகுக் கோண மாறுபாட்டிற்குரிய ஆற்றல் ஈட்டம் $dE/d\theta$ - ஐப் பெறலாம்.

அதாவது,

$$\frac{dE}{d\theta} = \frac{2q\,V \text{ பெருமம் } Sin\phi}{2\pi} \qquad (6.17)$$

ஆகும்.

சமன் 6.16 லிருந்து,

$$E_s\frac{d\phi}{d\theta} = \left(1 - \frac{E}{E_s}\right)E_s \qquad (6.18)$$

ஆகும். அல்லது, $E_s\dfrac{d\phi}{d\theta} = (E_s - E)$

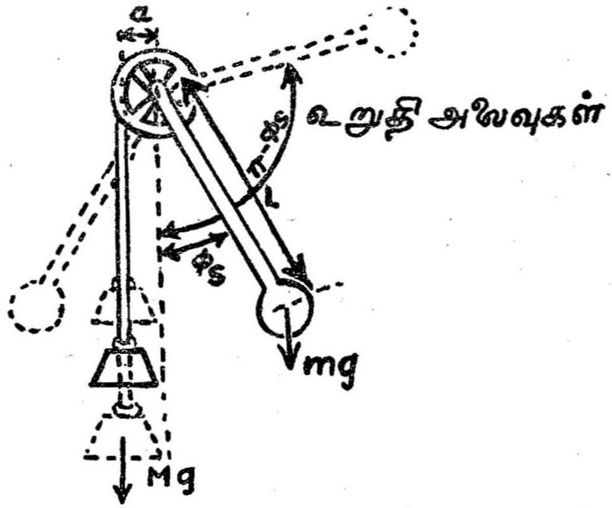
$$\therefore \frac{d}{d\theta}\left(E_s\frac{d\theta}{d\theta}\right) = \frac{d\phi}{d\theta}(E_s - E) \qquad (6.19)$$

சமன் 6.17 - லிருந்து 6.19 ஐ

$$\frac{d}{d\theta}\left(E_s\frac{d\phi}{d\theta}\right) = \frac{qV \text{பெருமம்}}{\pi}\left(Sin\,\phi_s - Sin\phi\right) (6.20)$$

என்று எழுதலாம். இச் சமன்பாடு கலைக்கோண அலைவுகளை விளக்குகின்றது. இனி, இந்த அலைவுகளைப் பற்றித் தெளிவானதொரு விளக்கம்பெற, படம் 6.2-ல் உள்ள ஊசலைக் கருதுவோம்.

படம் 6.2 -ல் l நீளமுள்ள சட்டமொன்றில் இணைக்கப்பட்டுள்ள mg எடையுள்ள ஊசல் ஒன்றைக் காணலாம். இந்தச் சட்டம் a



6.2 ஊசலும் சிங்க்ரோட்ரான் அலைவும்

ஆரமுடைய கம்பியொன்றுடன் இணைக்கப்பட்டுள்ளது. இவ் ஊசலின் மேல் திருப்பு - இரட்டை (*Torque*) செயல்படுகின்றது. சமநிலைக் கோணம் (*Equilibrium Angle*) ϕ_s ஐ ஒட்டி, ஊசல் அலைவுக்கு உட்படுகின்றது.

எனவே,

$$\text{கோண உந்த மாறுபாடு வீதம்} = (Ma^2 + ml^2) \quad \frac{d^2\phi}{dt^2} \qquad (6.21)$$

ஆகும்.

$$\left.\begin{array}{r}\text{செயல்படும் விசைகளின்}\\ \text{திருப்பு திறன்}\end{array}\right\} = Mga - mgl\, Sin\phi \qquad (6.22)$$

ஆகும். கோண உந்த மாறுபாடு வீதம்=செலுத்தப்பட்ட விசையின் திருப்புதிறன் என்றறிவோம். ஆதலால்,

$$(Ma^2 + ml^2)\frac{d^2\phi}{dt^2} = Mga - mgl\, Sin\phi \qquad (6.23)$$

ஆகும்.

இனி, சமன் 6.20-ல் E_s ஐ மாறிலியாகக் கொண்டு பகுநி காணில்,

$$E_s\frac{d^2\phi}{d\theta^2} = \frac{qV\text{பெருமம் } Sin\phi_s}{\pi} - \frac{qV\text{பெருமம்} Sin\phi}{\pi} \qquad (6.24)$$

எனப் பெறலாம். சமன் 6.24-ஐ 6.23 உடன் ஒப்பிடுவோம். சமன் 6.24 -ல் உள்ள θ விற்குப் பதிலாக t-ஐப் பதிலீடு செய்தோமானால்,

இச் சமன்பாடு தனி ஊசலின் அலைவைக் குறிக்கும் என்பதை அறியலாம். சமன் 6.23-லிருந்து சமநிலைக்கோணம் ϕ_s- ஐத் தீர்மானிப்போம். இச் சமநிலைக் கோணத்தை ஒட்டித்தான் அலைவுகள் நிகழ்கின்றன. எனவே, விசைகளின் திருப்பு திறனைச் சுழியமாக்குவதன்மூலம் நடுநிலைக் கோணத்தைத் தீர்மானிக்கலாம்.

ஆகவே, $$Mga = mgl \, Sin\phi$$

அல்லது, $$Sin\phi = Sin\phi_s = \frac{Ma}{ml}$$

ஆகும்.

சமநிலை உருவாக $Sin\phi_s > 1$ ஆகவேண்டுமாதலால் $Ma < ml$ ஆக வேண்டும். $Sin\phi_s = 1$ எனில் சமநிலை உறுதியற்றதாகும். இதனால், மிகச்சிறிய விலகுதல்கள் ஏற்பட்டாலும், ஊசல் பெரிதும் பாதிக்கப்பட்டு, தொங்குதானம் வழியே செல்லும் அச்சை யொட்டிச் சுழலத் தொடங்கும். இனி, இத் தனி ஊசல் ஒப்புமையைக் கொண்டு சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் துகளின் இயக்கத்தை ஆராய்வோம்.

ϕ_s - ன் மதிப்பு சரியானதாக அமையுமானால், பெரும் எண்ணிக்கையிலான துகள்கள் இந்த இசைவு கலைக்கோணத்தை ஒட்டிய அலைவிற்கு உட்பட்டு நிலைப்பாடு உடையனவாகி இறுதிப் பெரும ஆற்றலை அடையும். தனி ஊசல் ஒப்புமையிலிருந்து (படம் 6.2) $\pi - \phi_s$ கோணத்தை அடையாதவரைதான் தனிஊசல் நிலையான அலைவுகளை நிகழ்த்தும் என அறியலாம். $(\pi - \phi_s)$ கோணத்திற்குரிய நிலைதான் உறுதியிலாச் சமநிலைக்கு உரியதாகும். ஆகவே, இந் நிலையைக் கடந்த பின்னால், ஊசலானது அலைவுகளை நிகழ்த்தாமல் முன் கூறியவாறு சுழல ஆரம்பிக்கும். ஆகவே, இந்த ஒப்புமையின்படி சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகள்களைக் கருதுவோமெனில், அதிலும் நிலைப்பாட்டிற்கு என்று ஓர் எல்லை உண்டு. அதாவது, கலைக்கோண அலைவுகள் மிக அதிகமாகப் பெருக முடியாது. இசைவுறாத் துகளின் கலைக்கோணத்திற்கும் இசைவுறு துகளின் கலைக் கோணத்திற்கும் இடையேயுள்ள வேறுபாட்டிற்கும் ஒரு பெரும மதிப்புண்டு. இந்தப் பெருமமதிப்பு குறிப்பிட்டதொரு வரம்பிற்குள் அடங்கும்வரைதான் நிலைப்பாடு நீடிக்க முடியும்.

$\phi_s = 90°$ எனில் தனி ஊசல் உறுதியற்ற நிலையடையும் எனக் கண்டோம். அவ்வாறே, $\phi_s = 90°$ என அமையுமானால், சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் இசைவுறாத்துகள் இசைவுறு துகளை விட்டு விலகிக் கொண்டே இருக்கும். எனவே, இந்த இசைவுறாத் துகள் விரைவில் ரேடியோ அதிர்வெண்ணுடன் இசைவுறாமல் விலகிப் போகும். ஆகவே, $\phi_s = 90°$ என்பதை இசைவு கலைக்கோண மதிப்பாகக் கொள்ள முடியாது. $\phi_s = 0$ எனக் கொண்டோமானால்

ஏற்புடைத்தாக அமையும் வாய்ப்பு பற்றிக் கருதலாம். $\phi_s = 0$ எனில், $-\pi < \phi < \pi$ என்ற இடைவெளியில் நிலையான கலைக்கோண அலைவுகள் நிகழ வாய்ப்புண்டு. ஆனால், இவ்வித அலைவுகளில் ஒரு பாதி 'எதிர்க் குறிக் கலைக்கோணம்' (*Negative Phase*) உடையதாக அமைவதால், ஆற்றல் வளம் பெருகாமல், இழப்புத்தான் தோன்றும். இதனால் அயனிவாயிலிருந்து நேர்க்குறிக் கலைக்கோணத்துடன் (*Positive Phase*) வெளிவரும் அயனிகள்கூட ஒருசில சுற்றுகளுக்குப் பின்னால் ஆற்றலை இழக்கத் தொடங்கும். இவ்விதம், ஆற்றல் இழக்கும் அயனிகள் பொறியின் மையத்தை அணுகி முடுக்கத்திற்குப் பயனற்றுப் போகும். ஆகவே $\phi = 90°$ ஆகவோ, $\phi = 0°$ ஆகவோ அமைவது உகந்ததல்ல. எனவே, இந்த இரண்டு மதிப்புகளுக்கும் இடைப்பட்ட கலைக்கோண மதிப்பைக் கணிக்கலாம்.

இனி, சமன் 6.24 - ல் உள்ள $\frac{d\phi^2}{d\theta^2}$ என்னும் கூறை

$\frac{d\phi}{d\theta} \frac{d}{d\phi}\left(\frac{d\phi}{d\theta}\right)$ என்று குறிக்க,

$$E_s \frac{d\phi}{d\theta} \frac{d}{d\phi}\left(\frac{d\phi}{d\theta}\right) = \frac{qV_{\text{பெருமம்}}}{\pi}\left(Sin\phi_s - Sin\phi\right) \qquad (6.25)$$

என்றாகும். மேலும் $\frac{d\phi}{d\theta}$-வை ϕ' எனக் குறிப்போமானால்

$$E_s \phi' \frac{d\phi'}{d\phi} = \frac{qV_{\text{பெருமம்}}}{\pi} (Sin\phi_s - Sin\phi)$$

என்றாகும்.

$$\therefore \phi' \frac{d\phi'}{d\phi} = \frac{qV_{\text{பெருமம்}}}{E_s \; \pi} (Sin\phi_s - Sin\phi)$$

அல்லது,

$$\frac{1}{2} \frac{d}{d\phi}(\phi')^2 = \frac{qV_{\text{பெருமம்}}}{E_s \pi} (Sin\phi_s - Sin\phi) \qquad (6.26)$$

சமன் 6.26 - ஐத் தொகுநி காணில்,

$$\frac{1}{2} (\phi')^2 = \frac{qV_{\text{பெருமம்}}}{E_s \; \pi} (\phi Sin\phi_s + Cos\phi) + C \qquad (6.27)$$

என்று பெறலாம். சமன் 6.27 – ல் உள்ள C தொகுநியாக்க மாறிலி எனப்படும். தொடக்கக் கலைக்கோணம் ϕ_0 எனவும், தொடக்கக் கலைக்கோண வேகம் ϕ'_0 எனவும் குறிப்போமானால், சமன் 6.27 -லிருந்து, $(\phi'_0)^2 = \frac{2qV_{\text{பெருமம்}}}{\pi \, E_s} (\phi_0 \, Sin\phi_s + Cos\phi_0) + 2C$

$$(6.28)$$

என்றாகும்.

எனவே,
$$C = \frac{(\phi_0')^2}{2} - \frac{qV_{\text{பெருமம்}}}{\pi\ E_s}(\phi_0\ Sin\phi_s + Cos\phi_0) \quad (6.29)$$

C - ன் இம் மதிப்பை, சமன் 6.27 ல் பதிலீடு செய்ய,

$$(\phi')^2 = \frac{2qV_{\text{பெருமம்}}}{\pi E_s}\left\{(\phi-\phi_0)\ Sin\phi_s + Cos\phi - Cos\phi_0\right\} + (\phi_0')^2 \quad (6.30)$$

ஆகும்.

இனி, தனி ஊசல் ஒப்புமையிலிருந்து, ஊசல் நிலைப்பாடற்ற $\pi - \phi_s$ நிலையை அடையாதவாறு, நிலையான அலைவுகள் உருவாக்கக் கூடிய வீச்சே பெரும வீச்சாகும் எனக் கண்டோம். எனவே, ஒவ்வொரு தொடக்கக் கலைக்கோணத்திற் கெனவும் தொடக்கப் பெருமத் திசைவேகம் ϕ'_{0m} உண்டு. இந்தத் திசைவேகத்தினுல் நிலைப்பாடற்ற தன்மையை அடையாதவாறு ஊசல் காக்கப்படும். ஆகவே, கலைக்கோணம் $\phi = \pi - \phi_s$ எனில் அந் நிலையில் திசைவேகம் $\phi' = 0$ ஆகும். இப் பண்பைத் தவிர, சைக்ளோட்ரானில் துகளின் இயக்கத்தின்போது கண்ட மற்ருெரு பண்பினையும் கருதுவோம். சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் துகள்கள், முதல் சில சுற்றுகளில் மின்புலத்தினுல் 90° கலைக்கோணத்தை யொட்டிக் கொத்தாக்கப்படும் எனக் கண்டோம். எனவே, இப் பொறியிலும் முதல் சில சுற்று களுக்கு $\phi_0 = 90°$ எனக் கொள்ளலாம். இதன் பயனுகச் சமன் 6.30 - லிருந்து நிலைப்பாடுடைய அலைவுகளை நிகழ்த்தும் பெருமக் கலைக் கோண வேகம் ϕ'_{0m} - ஐக் கணிக்கலாம்.

$$(\phi'_{0m})^2 = \frac{2qV_{\text{பெருமம்}}}{\pi E_s}\left\{Cos\phi_s - (\pi/2 - \phi_s)Sin\phi_s\right\} \quad (6.31)$$

சமன் 6.15 - லிருந்து, கலைக்கோண வேகம்

$$\phi' = \frac{\omega - \omega_s}{\omega} \quad (6.32)$$

என்றுகும். இச் சமன்பாடு இசைவுறு துகளின் அதிர்வெண்ணுக்கும், பிற துகள்களின் அதிர்வெண்ணுக்கும் இடையில் உள்ள வேறுபாட்டையும் குறிக்கின்றது எனக் கூறலாம். மையத்தில், அயனிவாயி லிருந்து வெளிவரும் தருணத்தில், எல்லா அயனிகளின் அதிர் வெண்ணும் $\omega_0 = qB/M_0$ என்று இருக்கும். கலைக்கோண அலைவு களுக்கு உட்படப் போகும் அயனியின் ω_0-க்கும் ரேடியோ அதிர் வெண்ணுக்கும் இடையிலுள்ள வேறுபாட்டை சமன் 6.32 குறிக்

கின்றது எனலாம். விளங்கச் சொன்னால், அயனிவாயிலிருந்து வெளிவரும் பல அயனிகளில் எந்த அயனியின் அதிர்வெண் ω_0,

$$\left(\frac{\omega_0-\omega_s}{\omega_0}\right)^2 \leq (\phi'_{0m})^2 \qquad (6.33)$$

என்ற விதிக்கு உட்படுகின்றதோ, அந்த அயனிமட்டுமே நிலையான கலைக்கோண அலைவுகளுக்கு உட்பட்டு ஆற்றல்வளம் பெருக்கும். இவ் விதிக்கு உட்படாத பிற துகள்கள் யாவும் உரிய ஆற்றலைப் பெறுமல் தவறிப்போகும்.

இனி, நிலையான கலைக்கோண அலைவுகளுக்கு உட்படும் துகள் ஒன்றைக் கருதுவோம். அத் துகள், ஓரலகுச் கோணச் சுற்று *(Unit Angle of Revolution)* ஒன்றிற்கு நிகழ்த்தும் கலைக்கோண அலைவுகளின் எண்ணிக்கை, 'கலைக்கோண அலைவுகளின் அதிர்வெண்' எனப்படும். இந்த அதிர்வெண்ணை ω_ϕ என்று குறிப்போம்.

$$\omega_\phi = \left(\frac{qV_{\text{பெருமம்}}\, Cos\phi_s}{\pi\omega_s}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (6.34)$$

மேலும்,

கலைக்கோண அலைவுகளின் வீச்சு $\propto E_s^{-\frac{3}{4}}\,(V_{\text{பெருமம்}}\, Cos\phi)^{-\frac{1}{2}}$ ஆகும். இதிலிருந்து, ஆற்றல் பெருகப்பெருக வீச்சுக் குறைவது புலப் படும். அதாவது, ஆற்றல் பெருகப்பெருக கலைக்கோண அலைவுகள், ஆற்றல் அலைவுகள் இவற்றின் வீச்சுக்கள் தடையுறும். இதனால், முதல் கலைக்கோண அலைவிற்கு உட்பட்டுச் செல்லும் துகள், தொடர்ந்து வரும் அலைவுகளுக்கெல்லாம் ஈடுகொடுத்து, இறுதி ஆற்றல் வரை முடுக்கப்படும் என்று அறியலாம். எனவே, சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் கலைக்கோண நிலைப்பாட்டின் மூலம் அலைவுகளைக் கட்டுப் படுத்த முடியும் என்பது தெளிவாகும்.

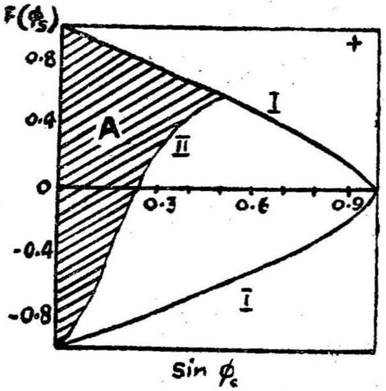
சமன் 6.30 - ன்படி சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானின் இயக்குதிறம் ஆனது, கலைக்கோண நிலைப்பாட்டில் துகள்களைக் கவரக்கூடிய அதிர்வெண்களின் எல்லையுடன் நேர்விகிதத்தில் உள்ளதெனலாம். இனி,

$$\Delta\omega_s = 2\omega_0\phi'_m$$

ஆதலால், $$\Delta\omega_s = 2\omega_0 \left[\frac{2qV_{\text{பெருமம்}}}{\pi M_0c^2}\left\{Cos\phi_s-(\pi/2-\phi_s)\,Sin\phi_s\right\}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (6.35)$$

இச் சமனில் $\left\{Cos\phi_s-(\pi/2-\phi_s)\,Sin\phi_s\right\}$ என்ற கூறை $F(\phi_s)$ எனக்

குறிப்போம். பொறியின் மையத்தில் அதிர்வெண்ணையும் மின்னழுத்தத்தையும் நிறுவிவிட்டோமெனில், பொறியின் இயக்குதிறமானது $F(\phi_s)$-ஐத் தான் சார்ந்திருக்கும் என்பதைச் சமன் 6.35 விளக்கும்.



படம் 6.3 சிங்க்ரோசைக்ளோட்ரானுக்குரிய இசைவு கலைக்கோணம்

$Sin\phi_s$ - க்கும், $F(\phi_s)$ க்கும் இடையே வரையப்பட்ட வரைபடத்தை படம் 6.3-ல் காணலாம். பொறியில் இயங்கும் அயனியொன்று, முதல் கலைக்கோண அலைவில் தோற்றுவாய்க்கு வருமா வராதா என்பதை இசைவுறு துகளின் ஆற்றல்தான் தீர்மானிக்கும். இசைவு தடத்தைக் (*Synchronous Orbit*) கருதும்போது, அதை ஆற்றல் உயர உயர விரிவடையும் தடமாகக் கருதலாம். இந்தத் தடத்தை ஒட்டியே இசைவுறுத் துகள்கள் யாவும் அலைவிற்கு உட்படுகின்றன.

முதல் கலைக்கோண அலைவின்போது ஏற்படும் இசைவு ஆர அதிகரிப்பானது, சிறும ஆற்றல் அலைவுக்குரிய இசைவுறுத் தடத்தின் சுருக்கத்தை ஈடு செய்வதாக அமையுமெனில், அயனி பொறியின் மையத்தை நெருங்காது.

$\phi_s = 0$ எனில், இசைவுறு துகள் ஆற்றல் எதையும் ஈட்டாது. எனவே, எல்லா அயனிகளும் தவறிப்போகும். இனி ϕ_s -ன் குறைந்த மதிப்புகளில் $\omega_s < \omega_0$ ஆதலால், துகள்கள் எதிர்க்குறிக் கலைக்கோணங்களை அடைய நீண்டநேரம் எடுத்துக் கொள்ளும். எனவே, இந்தத் துகள்கள் உரிய ஆற்றல் பெற்று, ஏக வழியுண்டு. ஆனால், $\omega_s > \omega_0$ எனில் துகள்கள் எதிர்க்குறிக் கலைக்கோணங்களை விரைவிலேயே அடைந்துவிடும். இதனால், எதிர்முடுக்கமடைந்த அயனிகள் மையத்தை நோக்கி நகர்ந்து இழந்துபோக நேரிடும். இவ்விதம் மையத்தை நோக்கி நகரும் துகள்கள் படம் 6.3 -ல், பகுதி A -ல் காட்டப்பட்டுள்ளன.

ஆகவே, படத்தில் காட்டியுள்ளவாறு இவ்வித இழப்பெல்லாம் நிகழ வாய்ப்பில்லாத கலைக்கோணம் 30° எனக் கூறலாம். இந்தக் கலைக்கோணமே பெரும்பாலும் சிங்க்ரோட்ரானை வடிவமைக்கும்போது பயன்படுகின்றது.

6.6. சைக்ளோட்ரானும் சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானும்

சைக்ளோட்ரானில் அமைந்துள்ள ரேடியோ அதிர்வெண் நிலைத்த மதிப்புடையதாக அமைக்கப்பட்டிருக்கும் என்றறிவோம். ஆனால், சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானிலோ வட்டமிடும் துகள்களின் கோண அதிர்வெண்ணோடு இசைவு பெறும்படி, முடுக்கும் மின்னழுத்த அதிர்வெண்ணும் மாற்றப்படும் எனக் கண்டோம். இதுவே இரு பொறிகளுக்கும் இடையில் உள்ள மிக முக்கிய வேறுபாடு எனலாம். சைக்ளோட்ரானில் புரோட்டான், டாய்ட்ரான், ஆல்ஃபாத்துகள் முதலானவை முடுக்கம்பெற பெருமக் காந்தப் பாய அடர்த்திகளின் விகிதம் 1 : 2 : 2 என்றமைய வேண்டும் எனக் கண்டோம். ஆனால் சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானிலோ எல்லாத் துகள்களுக்கும் ஒரே மதிப்புடைய பெருமக் காந்தப் பாய அடர்த்தி இருக்க வேண்டும். காட்டாக, பெரும ஆரம் $r = 2{\cdot}2$ மீட்டரும், காந்தப் பாயம் $2{\cdot}3$ வெபர்/மீட்டர்^{2}-ம் உடைய சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் இயங்கும் புரோட்டான்கள், டாய்ட்ரான்கள், ஆல்ஃபாத்துகள் இவை மூன்றும் பெறும் பெரும ஆற்றலுக்கு ஏற்ப அமையும் ரேடியோ அதிர்வெண் மதிப்புகளை அட்டவணை 6.1 -ல் காணலாம்.

அட்டவணை 6.1

துகள்கள்	T பெருமம் MeV	$\frac{\omega_{rf}}{2\pi}$ (மெகாஹெர்ட்ஸ்)		$\frac{f_{\text{பெருமம்}}}{f_{\text{சிறுமம்}}}$
		$T \approx 0$	T பெருமம்	
புரோட்டான்கள்	770	35	19·3	1·8
டாய்ட்ரான்கள்	470	17·5	14	1·25
ஆல்ஃபாத் துகள்	944	17·5	14	1·35

6.7. சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானுக்குரிய சில இயல்புகள்

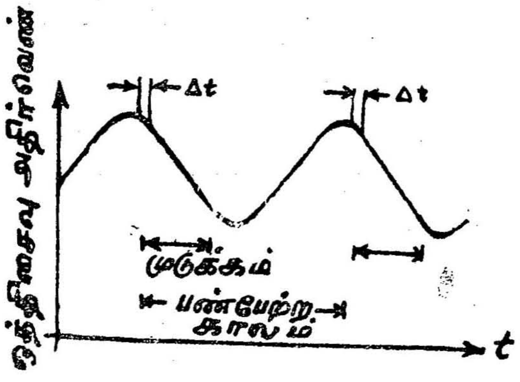
பெர்க்கிலி சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் மிக முக்கியமான விளைவொன்று காணப்பட்டது. புலஎண் $n = 0{\cdot}2$ ஆக அமைந்த பகுதியில் துகளியங்கும்போது பெரிதும் பாதிக்கப்பட்டது என அறியப் பட்டது. புலஎண் $0{\cdot}2$ என அமைந்த பகுதியில் துகள் இயங்கும்போது ஆரத்திசை பீட்டாட்ரான் அலைவுகளும் ஆயத்திசை பீட்டாட்ரான் அலைவுகளும் பிணைவுறுகின்றன (*Coupled*). இதனால், ஆயத்திசை அலைவு

களின் வீச்சு வரம்புகடந்து பெருகுகின்றது. இதன் விளைவாகத் துகள்கற்றை வெற்றிட அறையின் மேலும்கீழும் மோதி இழந்து போக நேரிடுகின்றது.

ஆகவே, இப் பொறியில் துகள்களை முடுக்கும்போது $n<0{\cdot}2$ என அமைந்த பகுதியில் உள்ள ஆரத்தில் இயக்கவேண்டும். காட்டாக, $n = 0{\cdot}1$ என அமைந்த ஆரத்தில் துகள் இயங்கும்போது, ஆயத்திசை அலைவுகளுக்கும் ஆரத்திசை அலைவுகளுக்கும் இடையில் ஒத்திசைவு நிலவாது. புலஎண் 0·2 என அமைந்த ஆரம், மாறுநிலை ஆரம் *(Critical Radius)* எனப்படும். இந்த மாறுநிலை ஆரத்தைவிடப் பெரிய ஆரமுடைய தடத்தில் துகள் இயங்கச் சிறப்பான அமைப்புகள் தேவை. இல்லையெனில், பெருமளவில் துகள்களை இழக்க நேரிடும். $(R_{\text{மாறுநிலை}} \times B_{\text{மாறுநிலை}})$-ன் மதிப்புதான் துகளின் பெருமஆற்றலை நிர்ணயிக்கின்றது எனக் கூறலாம். காந்தப் புலத்தில் இயங்கும் துகள்களை மாறுநிலை ஆரத்தை அடையும் முன்பே வெளியேற்றிவிட வேண்டும்.

அயனிகளின் ஆற்றலைப் பெருக்க B-ஐ அதிகமாக்கினால், காந்தத்தின் தெவிட்டுதல் *(Saturation)* பண்பு காரணமாகவும், பிறவற்றாலும், புலச்சிதைவின் எல்லை *(Boundary of Field Decay)* மையத்தை நோக்கிப் பரவும். இதனால் $R_{\text{மாறுநிலை}}$ மதிப்பு மிகவும் குறைந்துவிடும். ஆகவே, B-ன் மதிப்பை வரையறை இன்றிப் பெருக்க முடியாது.

சைக்ளோட்ரானைப் போலவே இப் பொறியிலும் மையத்திலுள்ள அயனிவாயிலிருந்து வெளிவரும் அயனிகள், உரிய தருணத்தில்



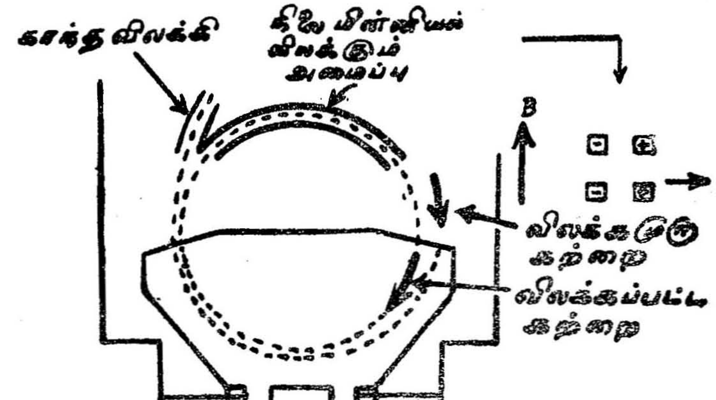
படம் 6.4 சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் துகளின் இயக்கம்.

நிலையான தடத்தை அடைந்து முடுக்கம் பெற்று இயங்கலாகின்றன. சைக்ளோட்ரானிலிருந்து ஆற்றல்பெற்று வரும் துகள்கற்றைக்கும்

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் ஆற்றல் பெற்றுவரும் துகள் கற்றைக்கும் வேறுபாடு உண்டு. சைக்ளோட்ரானில் துகளின் இயக்கம் தொடர்ச்சி யானது. எனவே, இதில் இயங்கி ஆற்றல் பெற்றுவரும் கற்றை செறிவு மிக்கதாக அமையும். ஆனால், சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானிலோ அதிர்வெண் பண்பேற்ற வட்டிப்பின் *(Frequency Modulation Cycle)* தொடக்கத்தில், குறிப்பிட்டதொரு கால இடைவெளியில் (Δt) உட்செலுத்தப்படும் துகள்கள் மட்டுமே முடுக்கம் பெறும் (படம் 6.4). இதனால், சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் ஆற்றல் பெற்று வரும் துகள் கற்றையின் செறிவு குறைந்திருக்கும்.

6.8. துகள் கற்றையை வெளியேற்றுதல்

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானில் இயங்கி ஆற்றல் பெறும் துகள் கற்றையை வெளியேற்றுதல் எளிதான செயலன்று. மாறுநிலை ஆரத்தில் துகள் இயங்கும்போது வீச்சுமிகுந்த அலைவுகள் நிகழ்ந்து



படம் 6.5 துகள் கற்றை வெளியேறுதல்

துகள்கள் தவறிப்போக நேரிடும் எனக் கண்டோம். ஆகவே, மாறுநிலை ஆரத்தை அடையும் முன்பே துகள்கள் வெளியேற்றப்பட வேண்டும்.

துகள் கற்றையை வெளியேற்ற இந்தப் பொறியில் மின்புலத்தைப் பயன்படுத்துதல் முடியாது. இயற்கையாக நிகழும் பீட்டாட்ரான்

அலைவுகளின் வீச்சையும் பெருக்குவதன் மூலம் வெளியேறும் பாதையை நோக்கித் துகள்களைத் திருப்பிவிடலாம். இவ்விதம் அலைவுகளைப் பெருக்க நிலைமின்னியல் விலக்க (*Electrostatic Deflection*) முறையைக் கையாளலாம். தடப்பெயர்ச்சி ஏற்படுத்தக்கூடிய அமைப்பை $R_{மாறுநிலை}$ ஆரத்திற்கு உள்ளேயே அமைக்கவேண்டும். இந்த அமைப்பை இரு தகடுகளால் அமைப்பது உகந்ததன்று. ஏனெனில், ஒவ்வொரு சுற்றின் போதும் துகள்களின் தடம் விரிவடைவதால், துகள்கள் தகடுகளின்மேல் மோதித் தவறிப் போக நேரிடும். எனவே தடப்பெயர்ச்சியை உருவாக்க இரு கம்பிகளைப் பயன்படுத்தலாம். ஏனெனில், அயனிக்கற்றை விரிவடையப் போதுமான இடம் அமைய ஏற்றதாக இரு கம்பிகள் அமையும். அயனிக்கற்றை $R_{மாறுநிலை}$ ஆரத்தை நெருங்கும்போது, இக் கம்பிகளிடையே 300 kV மின்னழுத்தம் 0·2 மைக்ரோ செகண்டு காலம் செலுத்தப்படும். இந்த மின்னழுத்தம் காரணமாக அயனிகள் உள் நோக்கிய திசையில் இயங்கும் (படம் 6·5). இவ்விதம், உள் நோக்கி இயங்கும் அயனிகள் ஏறத்தாழ ஒரு சுற்றை முடித்த பின்னல் பெருமவீச்சு அடையும் தருணத்தில் காந்த விலக்கியின் வழியே வெளியேறும். அயனிக்கற்றை ஆரத்திசையிலும் ஆயத்திசையிலும் பரந்து நிற்கும் காரணத்தால், வட்டமிடும் துகள் கற்றையில் ஒரு கூறு மட்டுமே வெளியேறும். ஆகவே, வெளியேறும் கற்றையின் செறிவு மெலிந்திருக்கும்.

6.9. குறிப்பிடத்தக்க சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான்

500 MeV ஆற்றலுக்குப் புரோட்டானை இயக்கவல்ல சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானைக் கருதுவோம். புரோட்டான் இந்த ஆற்றலை அடையும்போது அதன் நிறை 53·2% அதிகரிக்கும். ஆகவே இந்தப் பொறியில் புரோட்டான் இயக்கத்திற்குச் சார்பியல் கொள்கைகளைப் பயன்படுத்தவேண்டும். பெரும ஆரத்தில் காந்தப் புலமதிப்பு 2·0 வெபர்/மீட்டர்^{2} ஆகும். துகளின் இறுதி ஆற்றல் E எனவும் ஓய்வுநிலை ஆற்றல் 938 MeV எனவும் குறிப்போமெனில்,

$$E = T + E_0$$

$$= (500+938)\ MeV$$

ஆகும்.

அட்டவணை 6.2

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானின் இயல்புகள்

அளபுரு	அலகு	பெர்க்கிலி	ட்யூப்னு (Dubna)	ஜெனீவா
துருவத் துண்டுகளின் விட்டம்	மீட்டர்	4·8	6	6
பெருமக் காந்தப் புலம்	வெபர் /மீ^{2}	2·33	1·68	1·88
இரும்பின் எடை	டன்கள்	4,000	7,200	2,500
அதிர்வெண் பண்பேற்றம்	மெகா ஹெர்ட்ஸ்	36—13	26·5—13·6	29—16.5
முடுக்கும் மின்னழுத்தப் பெரும மதிப்பு	kV	9	15	19
சுழலும் கற்றை மின்னோட்டம்				
(a) புரோட்டான்	மைக்ரோ ஆம்பியர்	1	6.1 — 1·2	
(b) டாய்ட்ரான்	மைக்ரோ ஆம்பியர்	1		
(c) ஆல்ஃபாத் துகள்	மைக்ரோ ஆம்பியர்	0·25		
பெரும ஆற்றல்				
(a) புரோட்டான்	MeV	730	680	600
(b) டாய்ட்ரான்	MeV	460		
(c) ஆல்ஃபாத் துகள்	MeV	910		

எனவே,
$$R = \frac{E^2 - E_0^2}{B\,c}$$

$$= \frac{(1438)^2 - (938)^2}{3 \times 10^8 \times 2}$$

$$\therefore \quad R = 1 \cdot 8 \text{ மீட்டர்கள்.}$$

எனவே, 4 மீட்டர் விட்டமுடைய காந்த முனைகள் இப் பொறியில் பயன்படுகின்றன.

6.10. முடிவுரை

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானிலும் துகளின் பாதை சுருள் பாதையாகவே அமையும் எனக் கண்டோம். வட்டமிடுகின்ற துகளின் வேகம் மிகமிக, ஏற்படும் அதிர்வெண் மாற்றங்களுக்கேற்ப அலைவானின் அதிர்வெண்ணும் மாற்றப்படும் என்பதை அறிந்தோம்.

வெக்ஸ்லர்-மாக்மில்லனின் கலைக்கோண நிலைப்பாட்டுத் தத்துவம் செயல்படுத்தப்பட்டு ஆற்றல் வளம் பெருகுவதற்கு உகந்த தொடக்க கலைக்கோண மதிப்புகளைப் பெற ஊசலின் அலைவை ஒப்பு நோக்கினோம். அதிலிருந்து துகளின் தொடக்க கலைக்கோணம் 30° ஆக அமைவதே உகந்தது என்பதும் பெறப்பட்டது. இத்தகு தொடக்க கலைக்கோண மதிப்புடன் இயங்கி உரிய ஆற்றல் பெற்ற துகள்களைப் பொறியைவிட்டு வெளியேற்ற நிலைமின்னியல் விலக்க முறை செயல்படும் பாங்கும் ஆராயப்பட்டது.

சைக்ளோட்ரானைக் காட்டிலும் ஆற்றல் தர வல்லதாக இப் பொறி அமையினும், திண்மைக் காந்தத்தினால் (*Solid Magnet*) உண்டாகும் செலவைக் குறைக்க முடியவில்லை. வளையவடிவக் காந்தம் பயன்படும் பிற பொறிகளோடு ஒப்பிடும்போது, இப் பொறி சிக்கன மானதெனக் கூறமுடியாது.

7. எழிலார்ந்த பொறிகள்

7.1. முன்னுரை

அறிவியலாளர்கள் சைக்ளோட்ரானைப் பயன்படுத்தி நிறைமிகு அயனிகளை 20 முதல் 40 *MeV* வரை முடுக்கினர். அதே நேரத்தில் எலெக்ட்ரான்களை உயர்ஆற்றல் பெறுமாறு செய்ய முனைந்தனர். எலெக்ட்ரானை முடுக்குவதற்கு முதன்முதலில் நேரியல் முடுக்கிகள் பயன்படுத்தப்பட்டன. நேரியல் முடுக்கியில் தன் ஆற்றலைப் பெருக்கிக் கொள்ள எலெக்ட்ரான் மிகநீண்ட நேர்பாதையில் இயங்கவேண்டி யிருந்தது. எனவே, ஆற்றல் பெருகப்பெருகப் பொறியின் நீளமும் அதிகரித்ததால், செலவும் அதிகரித்தது. ஆகவே, வேறு தத்துவத்தைக் காணவேண்டிய கட்டாயம் ஏற்பட்டது. இதன் பயனாக, மாறா ஆரமுடைய வட்டத் தடத்தில் எலெக்ட்ரான்களை இயங்கவைத்து ஆற்றல் பெறச்செய்யும் தத்துவம் பிறந்தது.

1922-ல் விதரோ (*Widerö*) என்னும் அறிவியலாளர், மாறுகின்ற காந்தப்புலத்தைச் (*Alternating Magnetic Field*) சூழ்ந்துள்ள சுழலும் மின்புலத்தைப் (*Rotational Electric Field*) பயன்படுத்தி எலெக்ட்ரான்களை முடுக்கலாம் எனக் கண்டறிந்தார். 1928-ல் விதரோவின் தத்துவப்படி அமைக்கப்பட்ட பொறியின் வெளியிடுதிறன் குறிப்பிடத்தகும் வகையில் இல்லை. 1935-ல் ஸ்டீன்பெக் (*Steenbeck*) என்பார் இந்தத் தத்துவத்தைப் பயன்படுத்தி எலெக்ட்ரான்களை 1·8 *MeV* ஆற்றலுக்கு முடுக்கினர்.

மேலும், எலெக்டரான் இயங்கும் தடத்தின் நிலைப்பாட்டைக் குலைக்கும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளைக் கட்டுப்படுத்த முயற்சிகள் மேற்கொள்ளப்பட்டன. 1941-ல் கெர்ஸ்ட் (*Kerst*), செர்பர் (*Serber*) என்ற இரு அறிவியல் அறிஞர்களும் தடநிலைப்பாட்டிற்குரிய விதிகளை நிறுவினர். நடைமுறையில் வெற்றியளித்த முதல் பீட்டாட்ரான் 1941-ல் கெர்ஸ்ட்டினால் அமைக்கப்பட்டது. இந்தப் பீட்டாட்ரானி

லிருந்து 2·3 *MeV* ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரான் கற்றை பெறப்பட்டது.

எலெக்ட்ரான்களை, மாறு ஆரமுடைய வட்டத் தடத்தில் இயக்கி ஆற்றல் பெருக்கும் தத்துவத்தைத் தந்த விதரோவின் கருத்தின் அடிப்படையில் எழுந்த எழிலார்ந்த பொறி பீட்டாட்ரான் ஆகும். வளைபந்து வடிவ (*Doughnut Shaped*) அறையும், வளையக் காந்தத் துண்டு களும், இப் பொறிக்கு எழிலான அமைப்பைத் தந்தன.

இத்தகு சிறப்புகள் உடைய பீட்டாட்ரானின் அமைப்பையும், இயக்கத்தையும் இந்த அத்தியாயத்தில் காண்போம். பீட்டாட்ரான் செயல்படுவதற்கு, வழிப்படுத்தும் புலத்திற்கும் முடுக்கும் புலத்திற்கும் இடையே முக்கியமானதொரு தொடர்பு நிறைவு பெறவேண்டும். அத் தொடர்பு முதலில் கூறப்படும்:

மாறுகின்ற மின்புலத்தால் கிளர் சுருள்கள் (*Exciter Coils*) தூண்டப்படுவதால் செயல்படும் காந்தப்புலத்தின் இயல்பும் மின்புல இயல்பிற்கேற்ப மாறுபடும். ஆகவே, துகள்களை உட்செலுத்தும் போது மிகக் கவனமாக இருக்கவேண்டும். மேலும், உரிய கணத்தில் உட்செலுத்தப்பட்ட துகள், உற்ற ஆற்றலைப் பெற்றவுடன், ஏற்ற தருணத்தில் வெளியேற்றப்படவேண்டும். இவ்விரண்டும் செயல்படும் விதம் குறித்து விளக்கமாகக் கூறப்படும்.

மேலும், வெற்றிட அறையில் மட்டும் ஒரு சார்புப் புலம் செயல்படுவதனால், துகள் ஆற்றல்பெற உகந்த காலம் இருமடங் காவதும் விளக்கப்படும். இப் பொறியுள் ஆற்றல்ஈட்டும் துகள்கள் எல்லாம் மாறு ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் இயங்கும். ஆகவே, ஒவ்வொரு சுற்றை முடிக்கும்போதும் துகள்களின் ஆற்றல் பெருகும். துகள்களின் ஆற்றல் ஒவ்வொரு சுற்றின் முடிவிலும் எந்த அளவில் அதிகரிக்கும் என்பதும், காந்தப் பாய மாற்றத்திற்கும் ஆற்றல் ஈட்டத்திற்கும் இடையேயான தொடர்பு குறித்தும் தெளிவு செய்யப்படும்.

துகள் செலுத்தியான எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கியில் (*Electron Gun*) இருந்து, வெளிவரும் எலெக்ட்ரான்கள், பீட்டாட்ரானுள் செலுத்தப்பட்டு, மாறு ஆரமுடைய வட்டத் தடத்தில் இயங்கும் போது, செலுத்தியின் மேல் மோத வாய்ப்புண்டு. எனவே, இந்த இடரை விலக்கும் முறை குறித்தும் விளக்கம் தரப்படும்.

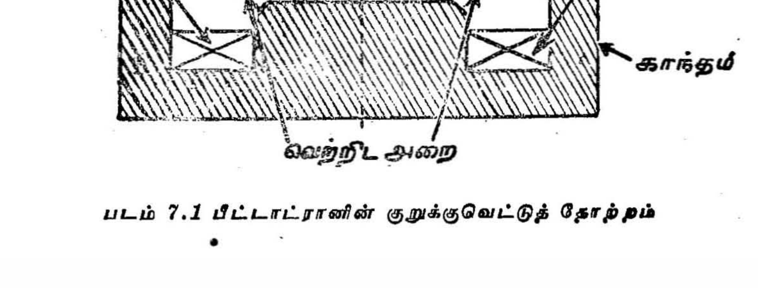
மாறு ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் இயங்கி, ஆற்றல் ஈட்டிய எலெக்ட்ரான்களை வெளியேற்றுதல் கடினமானதொரு பணியாகும். இதன் பயனாகத் துகளை வெளியேற்றக் கையாள வேண்டிய வழிமுறைகள் பற்றியும் கூறப்படும். *X* கதிர் தோற்றுவாயாகப் பீட்டாட்ரான் செயல்படும் வாய்ப்புக் குறித்தும் பேசப்படும்.

7.2. அமைப்பும் இயக்கமும்

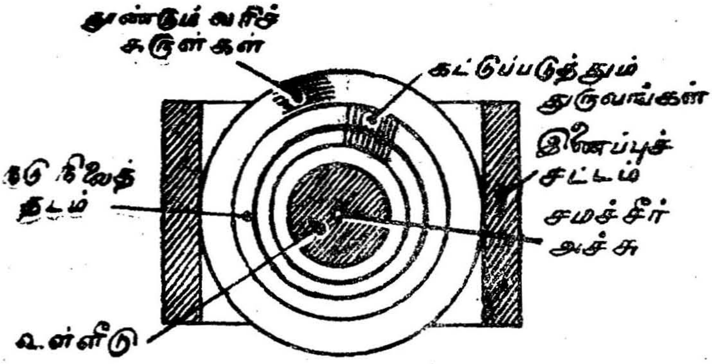
பீட்டாட்ரானில் எலெக்ட்ரான்கள் காந்தத்தூண்டலால் (*Magnetic Induction*) இயக்கப்படுகின்றன. மின்மாற்றியில் (*Transformer*) உள்ள தலைச்சுருளைப் (*Primary*) போன்று காந்தப் புலத்தை உருவாக்கும் கிளர் சுருள்களும் (*Exciter Coils*) துணைச் சுருளைப்(*Secondary*) போன்று வட்டமிடும் எலெக்ட்ரான்களும் அமைந் துள்ளன. எந்தவொரு முடுக்கும் பொறியிலும் துகளை முடுக்கும் புலம் ஒன்றும், வழிப்படுத்தும் புலமொன்றும் தேவையென அறிவோம். ஆனால், பீட்டாட்ரானில் செயல்படும் காந்தப் புலமானது இவ் விரண்டு விதங்களிலும் பணிபுரிகின்றது. எல்லா முடுக்கும் பொறி களிலும் உள்ள முடுக்கந்தரு மின்முனைகள் (*Accelerating Electrodes*) இப் பொறியில் இல்லாததே இதன் சிறப்பாகும்.

கிளர் சுருள்களுக்குத் தரப்படும் மாறு மின்னோட்டத்தால் பொறியின் மத்தியிலுள்ள உருளைவடிவ இரும்பு உள்ளீடு (*Iron Core*) மாறுகின்ற காந்தப் பாயமொன்றைத் தோற்றுவிக்கும். இந்த மாறுகின்ற காந்தப் பாயத்தால் உள்ளீடைச் சுற்றி வட்டவடிவப் புலக்கோடுகளுடைய சுழலுமின்புலம் (*Electric Rotational Field*) ஒன்று தோன்றும். வளைபந்து வடிவ (*Doughnut Shape*) வெற்றிடக் குழாய் ஒன்று துணைச் சுருளைப் போன்றுள்ளது. உள்ளீடைச் சூழ்ந்துள்ள சுழலு மின்புலத்தில் இந்த வெற்றிடக் குழாய் அமைக்கப்பட்டுள்ளது. இந்த வெற்றிடக் குழாயினுள் நுழையும் எலெக்ட்ரான்கள் மின்விசைக் கோடுகளைத் தொடர்ந்து, ஒவ்வொரு சுற்றின் முடிவிலும் தம் ஆற்றலைப் பெருக்கிக் கொள்ளும்.

இவ்வாறாக ஆற்றல் ஈட்டிய எலெக்ட்ரான்களை, உரிய வட்டத் கடத்தில் வழிப்படுத்தக் காந்தப் புலமொன்று தேவைப்படுகின்றது.



படம் 7.1 பீட்டாட்ரானின் குறுக்குவெட்டுத் தோற்றம்



படம் 7.2 சமச்சீர் தளத்தின் வழியே பீட்டாட்ரான் திட்டப் படம்

இதற்காக, இரு வளைய வடிவ (*Ring Shaped*) துருவத் துண்டுகள் வெற்றிட அறையின் மேலும் கீழும் வைக்கப்பட்டுள்ளன. இந்தக் கட்டுப்படுத்தும் காந்தத் துருவங்களால் உருவாகும் காந்தப் புலம், எலெக்ட்ரான்களின் மேல் லொரெண்ட்ஸ் விசையைச் செலுத்தி அவற்றை வட்டத்தடத்தில் நெறிப்படுத்துகின்றது. கட்டுப்படுத்தும் காந்தத் துருவங்களும், காந்தப் பாயத்தை உருவாக்கும் உள்ளீடும், ஒரே கிளர் சுருளுடன் இணைக்கப்பட்டுள்ளதால், அவற்றை ஒரே இணைப்புச் சட்டத்துடன் இணைக்கலாம்.

விளங்கச் சொன்னால், மைய உள்ளீட்டினால் (*Core*) உயர்ந்து கொண்டே இருக்கின்ற காந்தப் பாயமும், வளைபந்து வெற்றிட அறையினுள் உயர்ந்து கொண்டே இருக்கும் காந்தப்புலமும் தோன்றி, மாறா ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் எலெக்ட்ரான்களை முடுக்குகின்றன எனக் கூறலாம். இவ்விதம் இயங்கும் எலெக்ட்ரான்களின் வட்டத்தடமானது நிலைப்பாடு பெற்றால்தான் உரிய வகையில் ஆற்றல் பெருகும்.

7.3. பீட்டாட்ரான் தொடர்பு (Betatron Relation)

காந்தப் புலமானது வழிப்படுத்தும் பணியையும், முடுக்கந்தரு செயலையும் தொடர, முக்கியமானதொரு சூழ்நிலை நிலவ வேண்டும். வளைபந்து வெற்றிட அறையில் நடுநிலைத் தடத்தில் நிலவும் காந்தப் புலம் B_z எனவும், நடுநிலைத் தடத்திற்கும் உள்ளீட்டிற்கும் இடைப்பட்ட பரப்பில் நிலவும் காந்தப்புலச் சராசரி மதிப்பு $\bar{B}_c$ எனவும் குறிப்போம். இவ்விரு குறியீடுகளுக்கும் இடையில் குறிப்பிட்டதொரு தொடர்பு நிலவினால்தான், பீட்டாட்ரானில் துகள் ஆற்றல் பெறுவது இயலும்.

நடுநிலைத்தட ஆரம் r எனவும், அதனுடன் தொடர்புடைய காந்தப் பாயம் (*Magnetic Flux*) ϕ எனவும் கொள்வோமாயின்,

$$\phi = \pi r^2 \bar{B}_c \qquad (7.1)$$

ஆகும். இந்தக் காந்தப் பாயம் காலத்தையொட்டி மாறுமாறுல் விளையக்கூடிய மின்னழுத்த விசை $d\phi/dt$ ஆகும். எலெட்க்ரான் மேல் செயல்படும் மின்புலம் '$\mathcal{E}$' பெற்றுள்ள சுற்றோட்டம் (*Circulation*) $2\pi r\mathcal{E}$ எனக் கொண்டால்

$$-\frac{d\phi}{dt} = 2\pi r\mathcal{E} \qquad (7.2)$$

ஆகும். q மின்னூட்டமும், M நிறையுமுடைய எலெக்ட்ரான் v வேகமுடன், '$\mathcal{E}$' மதிப்புடைய மின்புலத்தில் இயங்கும்போது அதன் மேல் செயல்படும் விசை

$$F = -q\mathcal{E} \qquad (7.3)$$

ஆகும். மேலும்,

$$F = \frac{d}{dt}(Mv) \qquad (7.4)$$

என்றறிவோம். சமன்கள் 7.3, 7.2 லிருந்து,

$$F = \frac{q}{2\pi r} \frac{d\phi}{dt} \qquad (7.5)$$

ஆகும்.

தவிர, சமன்பாடு 7.1 –லிருந்து,

$$\frac{d\phi}{dt} = \pi r^2 \frac{d\bar{B}_c}{dt} \qquad (7.6)$$

எனப் பெறலாம். இதனால் சமன்கள் 7.4, 7.5, 7.6 - லிருந்து,

$$\frac{d(Mv)}{dt} = \tfrac{1}{2} qr \frac{d\bar{B}_c}{dt} \qquad (7.7)$$

என்றாகும். வட்டத் தடத்தில் துகள் இயங்க வேண்டுமெனில், மைய விலகு விசையும், லொரண்ட்ஸ் விசையும் சமமாக இருக்கவேண்டும் என அறிவோம். இதன் பயனாக, $\frac{Mv^2}{r} = qvB_g$

ஆகும்.

$$\therefore \; Mv = qrB_g \qquad (7.8)$$

எனவே,

$$\frac{d}{dt}(Mv) = qr \frac{dB_g}{dt} \qquad (7.9)$$

சமன்கள் 7.9-ஐயும் 7.7 -ஐயும் ஒப்பிடுவோமெனில்,

$$\frac{d B_g}{d t} = \frac{1}{2} \frac{d \overline{B}_c}{d t} \qquad (7.10)$$

ஆகும். சமன் 7.10 -லிருந்து தொகுநி காணல் மூலம்

$$B_g(t) = \frac{1}{2} \overline{B}_c (t) + C_1 \qquad (7.11)$$

எனும் தொடர்பைப் பெறலாம். $B_g (t)$ சுழியமானால் $\overline{B_c}$ (t) - ம் சுழியமாகும். எனவே, சமன் 7.11-ல் C_1-ம் சுழியமாகும். ஆகவே,

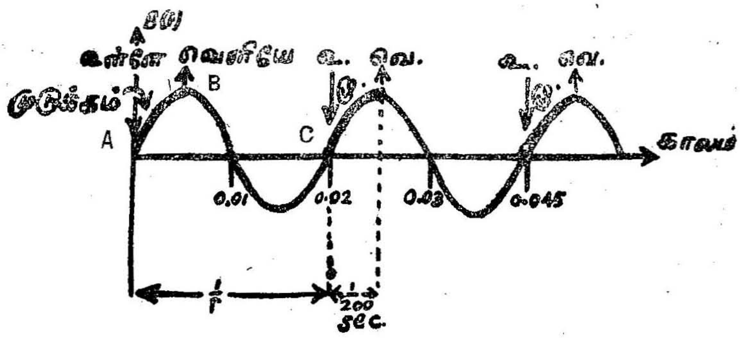
$$B_g (t) = \frac{1}{2} \overline{B}_c (t) \qquad (7.12)$$

ஆகும். இத் தொடர்பு பீட்டாட்ரான் தொடர்பு *(Betatron Relation)* எனப்படும். பீட்டாட்ரானில், துகள் இயங்கி ஆற்றல் பெற வேண்டுமெனில், நடுநிலைத் தடப்பரப்பிற்குள் அமையும் காந்தப்புலச் சராசரி மதிப்பு ($\overline{B}_c$), தடத்தின்மேல் செயல்படும் காந்தப்புல மதிப்பைப்போல் (B_g) இருமடங்காக அமையவேண்டும் என்று கூறலாம். இந்தத் தொடர்பில் துகளின் நிறையோ, வேகமோ இடம் பெறவில்லை என்பதும் குறிப்பிடத்தக்கது. காந்த அமைப்புகள் சீர் செய்யப்பட்டு, இந்த நிபந்தனை நிறைவேற்றப்படுமானால், எலெக்ட்ரான்கள் ஒரே தடத்தில் ஒளியின் வேகத்தில் இயங்கலாகும். மேலும், சமன்பாடு 7.12 - லிருந்து காந்தப் புலம் மையத்தில் அதிகமாகவும், தடத்தில் குறைந்தும் இருக்கவேண்டும் என்பது தெளிவாகும். அதாவது, புலமானது மையத்திலிருந்து ஆரத்திசையில் குறையும் என்று அறியலாம்.

இந்தப் பீட்டாட்ரான் தொடர்பு மட்டுமே துகளை உரிய முடுக்கம் பெறச் செய்யும் எனக் கூறிவிட முடியாது. முன்னர்க் கண்ட பீட்டாட்ரான் அலைவுகளால் துகளின் இயக்கம் பாதிக்கப்படலாம். கெர்ஸ்ட் சேர்பரின் தொடர்பில் இருந்து பீட்டாட்ரான் இயக்கம் பற்றி ஆராய்ந்ததை நினைவு கூர்வோம். புலம் சீரற்றதாக இருக்குமானால் தடம் நிலைப்பாடற்ற தன்மை பெறலாம் எனக் கண்டோம். எனவே, மென்குவிப்புப் பொறிகளில் *(Weak Focussing Machines)* புலஎண்ணின் (n) மதிப்பு 0 -க்கும் + 1 -க்கும் இடையில் அமைந்தால் தான் ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும் நிலைப்பாடு தோன்றும் எனவும் கண்டோம். ஆகவே, துகள் வட்டப் பாதையில் சீரான இயக்கம் பெற்று ஆற்றல்ஈட்டச் சமன்பாடு 7.12 நிறைவு பெறுவதுடன், மேற்சொன்ன புலஎண் மதிப்புகளும் நிலவும்படி பார்த்துக் கொள்ளவேண்டும். பெரும்பாலும் n–ன் மதிப்பு 0·7 ஆக இருக்கும்படி அமைப்பது நலம்.

7.4. எலெக்ட்ரான்களை உட்செலுத்துதல் (Injection of Electrons)

இனி, வெற்றிட அறையினுள் எலெக்ட்ரான்களை உட்செலுத்தும் போது கவனத்தில் கொள்ள வேண்டிய தொன்றுள்ளது. காந்தச் சுருள்கள், மாறு மின்புலத்தால் தூண்டப்படுகின்றன எனக் கண்டோம். எனவே, மாறுமின்புல இயல்பிற்கேற்பக் காந்தப்புலமும் மாறும். காந்தப்புலம் உயருகின்ற (*Rising*) கால இடைவெளி மட்டுமே துகள் முடுக்கம் பெற்றதாகும்; குறைகின்ற கால இடைவெளி முடுக்கத்திற்கு உகந்ததன்று. ஆகவே காந்தப்புலம்



படம் 7.3 பீட்டாட்ரான் இயக்கம்

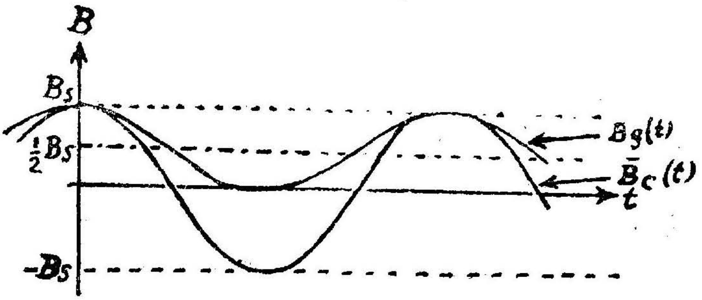
சுழியத்திலிருந்து முடுக்கந் தரவல்லதாக உயரத்தொடங்கும் தருணத்தில் எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கியிலிருந்து, எலெக்ட்ரான்கள் பீட்டாட்ரானுள் செலுத்தப்படவேண்டும். இவ்விதம், நுழைந்து ஆற்றல் பெறும் எலெக்ட்ரான்கள் புலமானது உச்ச மதிப்பை அடையும் தருணத்தில் வெளியேற்றப்பட வேண்டும். படம் 7.3 - ஐக் கவனிப்போமானால், இவ்வித இயக்கம் குறித்துத் தெளிவான விளக்கம் பெறலாம். காலத்தையொட்டிப் புலம் மாறுகின்ற விதத்தைச் சைன் வளைவில் (*Sine Curve*) காணலாம். புலம் உயரத்தொடங்கும் தருணத்தில் (A) பொறியுள் நுழையும் எலெக்ட்ரான்கள் வட்டத்தடத்தில் இயங்கி ஆற்றல் பெறுகின்றன. புலம் உச்சமதிப்பை அடையும் தருணத்தில் துகள்கள் பொறியை விட்டு வெளியேறுகின்றன. B என்ற புள்ளிஸ்ய அடைந்த பின்னுல் புலமானது விழத்தொடங்கி, மீண்டும் C-என்ற புள்ளியில்தான் முடுக்கந்தர வல்லதாக மாறுகின்றது. எலெக்ட்ரான்கள் இந்தத்

தருணத்தில்தான் மீண்டும் பீட்டாட்ரானில் உட்செலுத்தப் படலாம்.

ஆகவே, ஒவ்வொரு முறையும் புலம் சுழியத்திலிருந்து உயரும் தருணத்தில் எலெக்ட்ரான்கள் வளைபந்து அறையினுள் செலுத்தப் படவேண்டும் என்பதும், புலம் உச்ச மதிப்பை அடையும் தருணத்தில் அவை வெளியேற்றப்பட வேண்டும் என்பதும் தெளிவாகும். இதன் பயனாகப் பீட்டாட்ரானில் குறிப்பிட்டதொரு கால் வட்டிப்பில் (*Quarter Cycle*) தான் துகள்கள் இயக்கம் பெறும் என அறியலாம்.

எளிய பீட்டாட்ரான்களில் ஒரேயொரு காந்தச் சுற்றுதான் (*Magnetic Circuit*) உள்ளது. இந்தக் காந்தச் சுற்று, மாறு மின்னோட்டம் பாயும் சுருள்களால் கிளர்ச்சியூட்டப்படும் (*Excited*). பீட்டாட்ரான் தொடர்பின்படி $\bar{B}_c$-ஆனது B_g -ஐப் போன்று இரு மடங்காக இருக்கவேண்டும் எனக் கண்டோம். முடுக்கும் காந்த விசை உயரும்போது, வழிப்படுத்தும் காந்தப்புலம் (B_g) உயர்மதிப்பு அடையு முன்னரே, $\bar{B}_c$-ஐ உருவாக்கும் உள்ளீடு தெவிட்டுநிலையை அடைந்து விடலாம். இதனால், பீட்டாட்ரான் தொடர்பு பாதிக்கப் படலாம். எனவே, உள்ளீடு தெவிட்டுநிலை அடையும் வரைதான் B_g-ன் மதிப்பு உயரலாம். தெவிட்டு நிலையின்போது B_c-ன் மதிப்பு B_s எனக் கொண்டால், B_g -ன் மதிப்பு $\bar{B}_s/2$வை மிஞ்ச முடியாது என்பது தெளிவு.

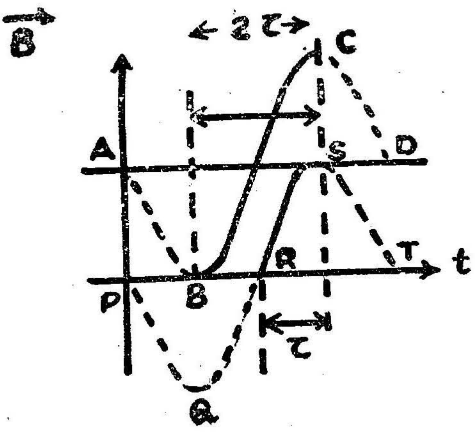
நடுநிலைத் தடத்தின் மேல் செயல்படும் $B_s/2$ மதிப்புடைய, வழிப்படுத்தும், மாறுகின்ற காந்தப் புலத்தின்மேல் $B_s/2$ மதிப்புடைய ஒருசார்புப் (*Bias*) புலமொன்று சுமத்தப்படுவதால் (*Superimposed*) தோன்றும் தொகுபயன் புலத்தின் (*Resultant Field*) இயல்பைப் படம் 7.4 -ல் காணலாம். தொகுபயன் புலமானது அரை வட்டிப்பில்



படம் 7.4 சார்புப் புலமும் பீட்டாட்ரான் இயக்கமும்

(Half Cycle) சுழியத்திலிருந்து உச்சமதிப்பை அடைகின்றது. இதனால், துகள் முடுக்கம் பெற உகந்த காலமானது இருமடங்கு ஆகிறது என்பதையும் அறியலாம். மையப் பகுதியில் உள்ள புலமோ ஒரு சார்பு *(Bias)* இல்லாத காரணத்தால் $-B_s$ க்கும் $+B_s$க்கும் இடையில் அலையும். படம் 7.4 -ல் இந்த இயல்பையும் காணலாம். மாறுகின்ற புலம் மட்டும் செயல்பட்டபோதும், மாறுகின்ற புலமும் ஒரு சார்புப் புலமும் *(Bias Field)* இணைந்த தொகுபயன் புலம் செயல் படும்போதும் அமையும் B_g ன் இயல்பைப் படம் 7.5 -ல் காணலாம்.

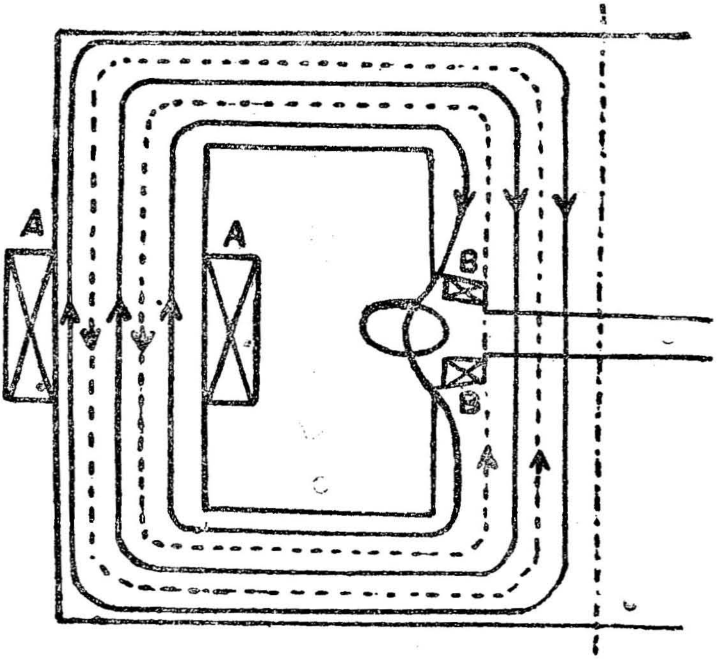
ஒருசார்புப் புலம் இல்லாதபோது B_g -ன் இயல்பை PQRST என்ற வரைகோடும், B_g -ன் மேல் ஒரு சார்புப் புலம் சுமத்தப்படும்



படம் 7.5 ஒரு சார்புப் புலமும் முடுக்கத்திற்கு உகந்த காலமும்

போது தோன்றும் இயல்பை ABCD என்னும் வரைகோடும் விளக்குகின்றன. ABCD-ல் பகுதி BC முழுதுமே முடுக்கத்திற்கு உகந்ததாகும். இதன் பயனாக, துகள் முடுக்கம்பெற உகந்த காலம் இரு மடங்கானதைப் (2τ) படம் 7.5-ல் காணலாம். நடைமுறையில் இத்தகு ஒருசார்பு மின்புலத்தைப் பெற காந்தச்சுற்று முழுமைக்கும் (சுருள்கள் A—படம் 7.6) மாறுமின்னோட்டக் கிளர்ச்சியும், மத்திய பகுதியில் மட்டும் செயல்பட நேர்மின்னோட்டக் கிளர்ச்சியும், (சுருள்கள் B—படம் 7.6) ஊட்டப்படும். B -சுருள் களினால் தோன்றும் காந்தப் பாயம் மத்தியபகுதியில் செயல்பட்டு

A சுருள்களினுல் தோன்றும் காந்தப் பாயத்தைஈடு செய்யும். இதனுல், உருவாகும் விளைவுப்புலம் வெற்றிட அறையில் மட்டுமே செயல்படும்.



படம் 7.6 வெற்றிட அறையில் ஒரு சார்புப் புலம்

படம்—7.6 -ல் புள்ளிக்கோடுகள் B சுருள்கள் தோற்றுவித்த பாயத்தையும், தொடர்கோடுகள் A சுருள்கள் தோற்றுவித்த பாயத்தையும் குறிக்கின்றன.

7. 5. பாய மாற்றமும் ஆற்றல் ஈட்டமும்
(Change in Flux and Energy Gain)

பீட்டாட்ரானில் இயங்கும் துகள், இறுதிப் பெரும ஆற்றலை அடையும் முன்பாகப் பலமுறை வட்டத் தடத்தில் சுழலும் எனக் கண்டோம். அவ்வாறு ஒவ்வொரு சுற்றை முடிக்கும்போதும், துகள் குறிப்பிட்டதோர் அளவு ஆற்றலை ஈட்டும். துகளானது பொறியில் N சுற்றுகள் சுற்றுவதாகக் கருதுவோம். எனவே, துகளானது ஒரு சுற்றில் அடையும் ஆற்றல் உயர்வை dE/dN என்று குறிப்போம்.

மேலும்,

$$\frac{dE}{dN} = \frac{dE}{dt} \cdot \frac{dt}{dN} \qquad (7{\cdot}13)$$

ஆகும். இதில், ஒரு சுற்றிற்கான நேரம் τ -ஐ dt/dN என்ற கூறு குறிக்கின்றது என்பது புலனாகும். எனவே,

$$\frac{dE}{dN} = \frac{dE}{dt} \cdot \tau \qquad (7.14)$$

அல்லது,

$$\frac{dE}{dN} = \frac{dE}{dt} \cdot \frac{2\pi}{\omega} \qquad (7.15)$$

ஆகும். துகள் இயங்குகின்ற வட்டத்தட ஆரம் r எனக் கொண்டால், துகள் ஒரு சுற்றில் இயங்கும் தூரம் $2\pi r$ ஆகும். 'ε' மின்புலத்தில் இயங்கும்போது துகள்மேல் செயல்படும் விசை 'εq' ஆதலால்,

$$\frac{dE}{dN} = 2\pi r \varepsilon q$$

$$= q \frac{d\phi}{dt} \qquad (7.16)$$

சமன் 7.16 -ஐ 7.15-ல் பதிலீடு செய்ய,

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi}{q\omega} \cdot \frac{dE}{dt} \qquad (7.17)$$

$$\therefore d\phi = \frac{2\pi}{q\omega} \cdot dE \qquad (7.18)$$

என்று பெறலாம். சமன் - 7.18 ஐத் தொகுநி காணில்,

$$\int_{\phi_1}^{\phi_2} d\phi = \frac{2\pi}{q\omega} \int_{E_1}^{E_2} dE$$

$$\therefore (\phi_2 - \phi_1) = \frac{2\pi}{q\omega} (E_2 - E_1) \qquad (7.19)$$

ஆகும்.

எலெக்ட்ரான்கள் ஒளியின் வேகத்தை விரைந்து நெருங்க வல்லனவாதலால் ω—ஐ ஒரு மாறிலியென்றே கூறலாம். ஆகவே, $(\phi_2 - \phi_1)$ - ஐ $\Delta\phi$ எனவும், $(E_2 - E_1)$- ஐ ΔE எனவும், குறிப்போமானால்,

$$\Delta\phi = k\Delta E \qquad (7.20)$$

ஆகும். எனவே, வட்டத் தடமொன்றில் இயங்கும் எலெக்ட்ரானின் ஆற்றல் ஒவ்வொரு சுற்றிலும் ΔE அளவு அதிகரிக்க வேண்டுமெனில், காந்தப் பாயமாற்றம் $\Delta\phi$ அளவாக அமைய வேண்டும் என்பது புலனுகும். அதாவது,

காந்தப் பாய மாற்றம் $\propto$ ஆற்றல் மாற்றம்

எடுத்துக்காட்டாக 50 ஹெர்ட்ஸ் (*Hertz*) அதிர்வெண்ணுேடு இயக்கப்படும் பீட்டாட்ரானைக் கருதுவோம். இப்பொறியில் இயங்கும் எலெக்ட்ரான்கள் ஒவ்வொரு சுற்றின்போதும் 10eV ஆற்றலை ஈட்டும். இவ்விதம் இயங்கும் எலெக்ட்ரான் ஒளிவேகத்தை அடைவதாகக் கொள்வோம். இந்த எலெக்ட்ரான் ஆனது, 1 மீட்டர் சுற்றளவுடைய வட்டத்தடத்தை ·005 செகண்டிலேயே 1, 500, 000 முறை சுற்றி வந்து விடும். ஒவ்வொரு சுற்றிலும் 10eV ஆற்றல் ஈட்டும் இந்த எலெக்ட்ரானின் இறுதி ஆற்றல் ·005 செகண்டிலேயே 15 MeV ஆக மாறும். இவ்வளவு குறுகிய காலத்திலேயே, எலெக்ட்ரான்கள் மிக உயர்ந்த ஆற்றல் அடைவது பீட்டாட்ரானுக்கே உரிய எழிலார்ந்த பண்பாகும். நிறை மிகுந்த துகள்கள் எலெக்ட்ரான்களைப் போல் ஆற்றல் பெற்ருலும் அவற்றின் வேகங்களை எலெக்ட்ரான்களின் வேகத்தோடு ஒப்பிடும்போது பல நூறு மடங்கு சிறியதாக இருக்கும். எனவே, நிறைமிகுந்த துகள்கள் மிகக் குறுகிய காலத்தில் (எடுத்துக்காட்டாக ·005 செகண்டு) பீட்டாட்ரானில் பல சுற்றுகள் இயங்கி ஆற்றல் பெற முடியாது. எனவே, நிறைமிகு துகள்களுக்குப் பீட்டாட்ரான் தத்துவம் பயன்படாது எனக் கூறலாம்.

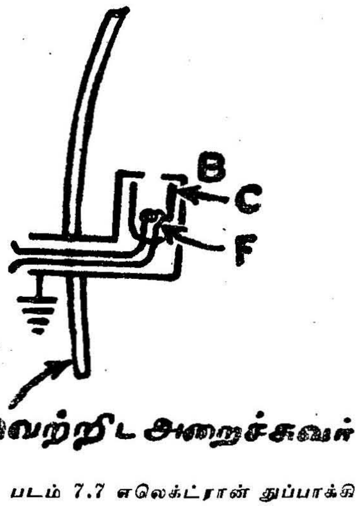
எலெக்ட்ரானின் தட வேகம் (*Orbital Velocity*) மிக விரைந்து ஒளியின் வேகத்தை நெருங்குவதால், பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் வீச்சும் குறையும். முடுக்கம் பெற்று, ஆற்றல் வளம் பெருக்கும் எலெக்டரான் கற்றை, இதன் பயனுக இறுக்கம் பெறும் என உணரலாம். ஆகவே, பீட்டாட்ரானில் எலெக்ட்ரானின் ஆற்றலை வரம்பின்றிப் பெருக்கலாம் எனத் தோன்றலாம். ஆனல், ஆற்றல் வளம் பெருகாமல் தடுக்கும் முக்கிய இடர்ப்பாடு ஒன்று இந்தப் பொறியில் உள்ளது.

ஐவானென்கோ (*Iwanenko*), போமெரான்சக் (*Pomerantchak* என்னுமிரு அறிவியலாளர்கள் வட்டத்தடத்தில் இயங்கும் எலெக்ட்ரான்கள் கதிர்வீச்சைத் தொடர்ந்து வெளியிட்டு ஆற்றலை இழக்க நேரிடும் எனக் கண்டறிந்தனர். மேலும், எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் பெருகப் பெருக, இந்த இழப்பும் பெருகும் எனவும் கண்டனர். எலெக்ட்ரான் ஒரு சுற்றில் ஈட்டும் ஆற்றல், கதிர் வீச்சால் ஒரு சுற்றில் இழக்கும் ஆற்றலுக்குச் சமமானல், எலெக்ட்ரான்கள் ஆற்றலை ஈட்டா என்பது தெளிவு.

இத்தகைய சூழ்நிலை 500 *MeV* ஆற்றல் எல்லையில் நிலவலாம் என்று ஐவானென்கோவும், போமெரான்சக்கும் அறிந்தனர். தவிரவும் கதிர் வீச்சினால் ஏற்படும் இழப்பு நீடிக்குமானால் துகள் ஒரு சுற்றில் ஈட்டும் ஆற்றல் காந்தப்புல உயர்வோடு இசைவுறாது. எனவே, துகளியங்கும் தடத்தின் விட்டம் குறையத் தொடங்கும். காட்டாக 100 *MeV* பீட்டாட்ரானைக் கருதுவோம். இப் பொறியில் முடுக்கத்தின் முடிவில் கதிர்வீச்சு இழப்பின் காரணமாக நடுநிலைத்தட விட்டம் 6 மி.மீ குறைந்து விடும். ஆகவே, ஆற்றல் மாற்றத்தோடு காந்தப்புல மாற்றம் இசைய வேண்டுமெனில் (சமன் - 7-20) காந்தப் புலம் உயரும் வீதத்தைக் குறைக்கவேண்டும். இத்தகு குறைபாடுகளின் காரணமாகப் பீட்டாட்ரானில் பெறக்கூடிய பெரும ஆற்றல் 300 *MeV* ஆக அமைந்து விட்டது. எழிலார்ந்த பீட்டாட்ரான் தத்துவத்தால் தோன்றிய, இப் பொறியில் அமைந்த இடர்ப்பாடுகள் அறிவியல் வளர்ச்சிக்கு முட்டுக்கட்டையாக இல்லாமல் புது கருத்துக்களின் பிறப்புக்கு வித்தூன்றின. இந்தத் தடையை உடைத்தெறிந்து மேலும்மேலும் ஆற்றல்மிகு எலெக்ட்ரான்களைப் பெறவேண்டும் என அறிவுலகம் துடித்தது. இதன் விளைவாகச் சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகள் தோன்றின.

7.6 எலெக்ட்ரான்களை உட்செலுத்துதல்

பீட்டாட்ரானில் எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கியொன்று (*Electron Gun*) அயனிவாயாகப் பயன்படுகின்றது. படம் 7.7 - ல் உள்ளவாறு எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கியொன்றில் F எனும் ஓர் இழையும் (*Filament*) அதைச் சூழ்ந்த குவிக்கும் மின்முனை C - ம் உள்ளன. எலெக்ட்ரான்கள் வெளியேற வசதியாகத் துளையொன்றையுடைய B எனும் பெட்டியினுள்ளே F-ம், C - ம் உள்ளன. Bயானது தரையுடன் இணைக்கப் பட்டுள்ளது. இழை F எதிர்மின்னழுத்தம் பெறும். பெட்டி B- உடன் ஒப்பிடும்போது, இழை F எதிர் மின்னழுத்தம் பெற்றிருப்பதால், சூடேற்றப்பட்ட இழையிலிருந்து *V* எலெக்ட்ரான் வோல்ட் இயக்க ஆற்றலுடன் எலெக்ட்ரான்கள் வெளிவரும். நமக்குத் தேவைப்படும்



படம் 7.7 எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கி

அளவிற்கு வெளிவரும் எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றலை மாற்றலாம். காட்டாக, ஒரு சில கிலோவோல்ட்டில் இருந்து 100 *kV* வரை ஆற்றல் உடைய எலெக்ட்ரான்களை இந்த எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கியிலிருந்து பெறலாம். எலெக்ட்ரானின் தொடக்க ஆற்றலைப் பொறுத்தே அதன் இறுதி ஆற்றல் அமைவதால், உட்செலுத்தியில் இருந்து வெளி வரும் எலெக்ட்ரான் கற்றை உரிய ஆற்றல் பெறுமாறு செய்வது மரபு.

பொறியிலுள்ள வெற்றிட அறையின் வெளிப்புறச் சுவரின் வழியாக எலெக்ட்ரான் செலுத்தி பொருத்தப்பட்டு இருக்கும். செலுத்தியைத் துகள் இயங்குகின்ற தடத்தில் அமைப்போமானால், ஒரு சுற்றை முடித்து வரும் எலெக்ட்ரான்கள் செலுத்தியின் மேல் மோதித் தவறிப்போகும் வாய்ப்புண்டு. எனவே, இந்த செலுத்தியின் முனை $0<n<1$ என அமைந்த புல எல்லையின் விளிம்பில் இருக்கும்படி அமைத்தல் நலம். மத்தியத் தடத்திற்கும் செலுத்திக்கும் இடையில், இவ்விதம் போதுமான இடைவெளி இருக்குமாறு செய்தால் நிலையான தடங்கள் (*Stable Orbits*) உருவாகப் போதுமான இடம் உள்ளதெனலாம். உட்செலுத்தப்பட்ட எலெக்ட்ரான்கள் செலுத்தி யுடனோ, அல்லது வெற்றிட அறையின் சுவருடனோ மோதித் தவறிப் போகலாம். எனவே, இவற்றையெல்லாம் விலக்கி, உயர்ந்த 'உட்செலுத்தும் இயக்குதிறம்' (*Injection Efficiency*) நிலவுமாறு செய்தல் வேண்டும்.

உட்செலுத்தப்பட்ட துகள், பொறியுள் இயங்குபோது தடநிலைப்பாடுபெற பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கு உட்படும். எனவே, ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும் நடுநிலைத்தடம் சார்ந்த அலைவுகள் நிகழலாம். இந்த அலைவுகளினால், எலெட்ரான் கற்றை செலுத்தியின் மேல் மோத வாய்ப்புண்டோ எனக் காணலாம். உட்செலுத்தப்பட்ட எலெக்ட்ரான்கள் முதன் முதலில் சிறும ஆர அலைவிற்குத்தான் (*Minimum Radial Oscillation*) உட்படும். எனவே, அவை செலுத்தியின்மேல் மோதா. ஆனால், இரண்டாம் சுற்றில் துகள்கள் ஆரத்திசையில் பெரும அலைவிற்கு உட்படலாம். எனவே, துகள் கற்றையில் ஒரு கூறு செலுத்தியின் மேல் மோதித் தவறிப் போகலாம். ஆனால், இந்நிலையிலும் செங்குத்துத் திசையில் நிகழும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் காரணமாகத் துகள் கற்றையில் ஒரு கூறு செலுத்தியைத் தாண்டிச் சென்றுவிடும். ஆகவே, உட்செலுத்தப்பட்ட எலெக்ட்ரான்களில் ஒரு சிறுபகுதி தான் இரண்டாம் சுற்றில் இயங்கும். இதற்குள்ளாக அலைவுகள் தடையுறு வதாலும் கெர்ஸ்ட் கூறியதன் சுருக்கம் காரணமாகவும், துகளின் தடம் செலுத்தியின் முனையை விட்டு விலகிச் சுருங்கிவிடும். எனவே,

இனிமேல் துகள்கள் செலுத்தியின்மேல் மோதிட வாய்ப்பு இல்லை. இந்தத் துகள்கள் மட்டுமே பிற இடர்ப்பாடுகளுக்கும் ஈடுகொடுத்துத் தொடர்ந்து முடுக்கம் பெறும். எனவே, உட்செலுத்தப்படும் எலெக்ட்ரான்களில் ஒரு சிறு கூறு மட்டுமே பல இடர்ப்பாடுகளுக்கும் தப்பித்து ஆற்றல் பெறமுடியும் என்று உணரலாம். எனவே, இக் குறையை விலக்க வேறு முறையொன்று கையாளப்பட்டது.

உட்செலுத்தல் உரிய நேரத்திற்கும் மேலே தொடரப்படுவதாகக் கருதுவோம். உரிய தருணத்தில் வரும் எலெக்ட்ரான்கள் முடுக்கம் பெறலாம். இதே சமயத்தில் நேரம் கழித்து வரும் எலெக்ட்ரான்கள் தவறிப்போக நேரிடலாம். இந்த எலெக்ட்ரான்கள் சுழன்று வரும் போது மாறுகின்ற காந்தப்புலம் ஒன்றைத் தோற்றுவித்து, மத்தியிலிருந்து காலத்தை யொட்டி உயரும் காந்தப் பாயத்தை விரைந்து உயராமல் தடுக்கும். ஆகவே, எலெக்ட்ரான்கள் செலுத்தியுடன் மோதாமால் உள்நோக்கிச் சுழல இது துணை செய்யும். இதனால், ஆற்றல் பெறும் துகள்கற்றை செறிவுமிக்கதாக அமையும்.

7.7. முடுக்கத்தை முடித்தல்

காந்தப்புலம் உயரத் தொடங்கும் தருணத்தில், வெற்றிட அறையினுள் செலுத்தப்படும் எலெக்ட்ரான்கள் வட்டத் தடத்தில் இயங்கி ஆற்றலைப் பெருக்கிக் கொள்ளும் எனவும், இவ்விதம் ஆற்றல் மிகுத்துக் கொள்ளும் எலெக்ட்ரான்களைக் காந்தப்புலம் உச்சமதிப்பை அடையும் முன்பாகவே தடத்தைவிட்டு வெளியேற்ற வேண்டும் எனவும் கண்டோம். இல்லையெனில், தொடர்ந்துவரும் சுற்றுகளில் எலெக்ட்ரான்கள் எதிர்முடுக்கம் பெறும் எனவும் கண்டோம்.

எனவே, உரிய ஆற்றல் பெற்ற எலெக்ட்ரான்களைக் காந்தப்புலம் உச்சமதிப்பை அடையும் முன்பாகவே, தேவையான இலக்கின்மேல் மோதச் செய்து விளைவுகளை நோக்கலாம்; அல்லது வளைபந்து அறையிலிருந்து மீட்டுப் புற அமைப்பிற்கு கொண்டு செல்லலாம். மாறு ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் இயங்கும் எலெக்ட்ரான்களை மீட்க நடுநிலைத் தடம் மாற்றப்பட வேண்டும். நாம் முன்னர் நிறுவிய பீட்டாட்ரான் தொடர்பின்படி (சமன்-7.12) வழிப் படுத்தும் புலம் (B_g), உள்ளீடினால் தோன்றும் புலத்தில் $(\overline{B}_c)$ பாதியாக இருக்க வேண்டும் என அறிவோம். இப்பொழுது B_g-ஐ மட்டும் குறைப்போமானால் பீட்டாட்ரான் தொடர்பு நிறைவேறாது. இந் நிலையில் துகளியங்கும் தடமானது விரிவடையும். எனவே,

எலெக்ட்ரான்களை வெளியேற்றுவது எளிதாக முடியும். இவ்விதம் தடத்தை விரிவடையச் செய்யப் பின்வரும் முறை கையாளப் படுகின்றது.

கட்டுப்படுத்தும் துருவங்களின் *(Controlling Poles)* மேல் வைக்கப்படும் உதவிச் சுருள்களில் *(Auxillary Coils)* உரிய தருணத்தில், உரிய திசையில், மின்துடிப்பு உருவாக்கப்படும். இதனால், கட்டுப்படுத்தும் புலத்தை எதிர்க்கும் புலமொன்று தோன்றும். இதனால் B_g-யானது $B_c/2$ க்குச் சமமாகாமல் குறையத் தொடங்கும். ஆகவே, நடுநிலைத் தடம் விரிவடையும். இந்தப் புதுச் சூழ்நிலைக்கேற்ப அமையும் புதுத்தடமே துகளின் நடுநிலைத்தடமாக மாறும். இந்தத் தடத்திலிருந்து எலெக்ட்ரான்களை வெளியேற்றுதல் எளிது. இவ்வாறு தடம் அடையும் விரிவு, வரம்பு வட்டம் ஒன்றிற்குள் அடங்கும், இந்த நிலையில் இருந்து சிறிதளவே விலகுதல்கள் ஏற்பட்டாலும் எலெக்ட்ரான்கள் முடிவற்று விரிகின்ற சுருள்பாதையில் இயங்குத் தவறிப் போக நேரிடும்.

7.8. பீட்டாட்ரானும் இலக்கு எக்ஸ் - கதிரும்

பீட்டாட்ரானில் இயங்கி ஆற்றல் மிகுத்துக் கொண்ட எலெக்ட்ரான்களின் மூலம் X கதிர்களைப் பெறுவது இப் பொறியின் முக்கிய பயன் எனலாம். எனவே, X கதிர் தோற்றுவாய்களாகப் பீட்டாட்ரான் பெரிதும் பயன்படுகிறது. X கதிரைத் தோற்றுவிக்க வல்ல இலக்கை, வரம்பு தடத்திற்குள்ளேயே அமைக்கவேண்டும். இந்த இலக்கு, ஒரு சில மில்லி மீட்டர் அகலமே உடையதாக இருக்கும். கற்றை வரும் திசையில் அமையும் இலக்கின் தடிப்பு மிகச் சிறியதாக அமையுமானால் எலெக்ட்ரான்கள் இலக்கை ஊடுருவும். இதனால், X கதிர் இழப்புத் தோன்றலாம். இலக்கின் தடிப்பு மிக அதிகமாக அமையுமானால், இலக்கின் மேல் மோதும் எல்லா எலெக்ட்ரான்களும் அதனால் உட்கவரப் படலாம் *(Absorbed)*. இப்பொழுது தோன்றும் X கதிரின், ஆற்றல் பரவல் *(Energy Distribution)* கீழ் ஆற்றல் எல்லைகளிலேயே நிலவும். எலெக்ட்ரான் ஆற்றல் X கதிர்களாக மாறுவதற்குரிய இயக்கு திறம் *(Efficiency)* எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றலையையே சார்ந்திருக்கும். எலெக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் உயர்ந்ததாக அமையுமானால், இயக்கு திறமும் உயர்ந்ததாகவே அமையும். மேலும் உயர்ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரான்களைப் பயன்படுத்துவதன் மூலம் வெப்பத்தினால் தோன்றும் ஆற்றல் இழப்பைத் தவிர்க்கலாம்.

பின்வரும் அட்டவணையில் எலெக்ட்ரான் ஆற்றலுக்கும், *X* கதிர் ஆற்றலுக்கும் உள்ள தொடர்பைக் காணலாம்.

அட்டவணை 7.1

எலெக்ட்ரான் ஆற்றல் (*MeV*)	0·1	1	10	100
X கதிர் ஆற்றலுக்கும் கவரப்பட்ட எலெக்ட்ரான் ஆற்றலுக்கும் உள்ள விகிதம்	0·06	7	41	93

எலெக்ட்ரான் ஆற்றல் அதிகரிக்க, அதிகரிக்க இயக்கு திறம் பெருகும் என்பது இந்த அட்டவணையிலிருந்து தெளிவாகும்.

7.9. குறிப்பிடத்தக்க சில பீட்டாட்ரான்கள்

1940–ல் கெர்ஸ்ட்டினுல் உருவாக்கப்பட்ட பீட்டாட்ரான் 2·3 *MeV* ஆற்றல் தரவல்லதாகும். இந்தப் பீட்டாட்ரானில் செலுத்தப்படும் துகளின் தொடக்க ஆற்றல் 0·6 *keV* ஆகும். புலஎண் மதிப்பு 0·67 ஆகும். 1952-ல் கெர்ஸ்ட்டினுல் உருவாக்கப்பட்ட பீட்டாட்ரான் 340 *MeV* ஆற்றல் தரவல்லதாகும். இப் பொறியில் புலஎண் மதிப்பு 0·25 முதல் 0·6 வரை இருக்கும். துகள்கள் 1·235 மீட்டர் ஆரமுடைய நடுநிலைத் தடத்தில் 100 முறை சுற்றிவந்து ஆற்றலை ஈட்டும். துகளின் தொடக்க ஆற்றல் 100 *keV* ஆகும். 1962-ல் மசாசூட்டெஸில் அமைந்த பீட்டாட்ரான் மிகச் சிறந்த தாகும். இந்தப் பீட்டாட்ரான் 6 *BeV* - இலிருந்து, 7 *BeV* வரை ஆற்றல் தரவல்லதாகும்.

7.10. முடிவுரை

இந்த எழிலார்ந்த பொறியின் அமைப்பையும், அதன் இயக்கத் கத்திற்கான பீட்டாட்ரான் தொடர்பையும் கண்டோம். இப் பீட்டாட்ரான் தொடர்பு குலையாதவாறு, வழிப்படுத்தும் காந்தப் புலமும், முடுக்கந்தரு மின்புலமும் அமையவேண்டும் எனவும் அறிந்தோம் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் காரணமாக தடநிலைப் பாடு குலையாமலிருக்கப் புலஎண் மதிப்பு 0·7 ஆக அமைய வேண்டும் எனவும் கண்டோம்.

அட்டவணை. 7.2.

பீட்டாட்ரானின் இயல்புகள்

அளபுரு	அலகு	கெர்ஸ்ட் 1940	கெர்ஸ்ட் 1942	குண்ட் (*Gund*) 1944	பீர்மன் & ஓலே (Beerman & Oele) 1949	விதரோ 1950	குண்ட் 1952	கெர்ஸ்ட் 1952	விதரோ 1959
நடுநிலை ஆரம்	மீட்டர்	0·075	·19	0·083	0·08	0·245	0·105→0.095	1·23 5	0·245
இணைப்புச் சட்டம்	மீட்டர்		·9 × 1·35	0·46 × 0·64 × 0·20		0·70 × 1·22	0·50 × 0·74 × 4·24	0·07 × 0·04 × 0·019	0·70 × 1·22
புல எண்	—	0·67	0·75	0·5	0·5	0·48	0·3	0·25→0·6	0·48
மொத்த எடை	டன்கள்	0·15	3·5	0·26		4	0·39	350	4
அதிர்வெண்	ஹெர்ட்ஸ்	600	180	550	2·500	50	50	60	50
நடுநிலைத் தடத்தில் பெருமக் காந்தத் தூண்டல் (B_s)	வெபர்/மீட்டர்²		0·36	2·6	0·4	0·42	0·56	0·925	0·50
பெரும ஆற்றல் சட்டம்/சுற்று	*eV*	25	56	25	150	31	6·6	3,000	37
சுற்றுகளின் எண்ணிக்கை	$\times 10^5$	1	3·6	2·6	0·6	10	2·35	1·4	10
தொடக்க ஆற்றல்	*keV*	0·6	20	4	3	50 - 60	45	100	50 - 60
இறுதி ஆற்றல்	*MeV*	2·3	20	6	9	31	15·5	340	37

இப் பொறியில்,மாறுகின்ற காந்தப் பாயத்தால் தோன்றும் சுழலு மின்புலத்தால் எலெக்ட்ரான்கள் முடுக்கப் படுகின்றன என்பது தெளிவு செய்யப்பட்டது. காந்தச் சுற்று, மாறுமின்புலத்தால் தூண்டப்படுவதால் குறிப்பிட்டதொரு கால இடைவெளிதான் முடுக்கத்திற்கு உகந்ததெனவும், இக் கால இடைவெளியை இரட்டிப் பாக்க ஒருசார்புப் புலம் செயல்படுத்தப்படலாம் எனவும் விளக்கப் பெற்றது.

துகளின் ஆற்றலில் ஏற்படும் மாற்றம், காந்தப்பாய மாற்றத் துடன் நேர்விகிதத்தில் உள்ளதென நிறுவப்பட்டது. வட்டத் தடத்தில் இயங்கும் எலெக்ட்ரான்கள் கதிர்வீச்சால் ஆற்றல் இழக்கக்கூடிய வாய்ப்புக் குறித்தும், அதனுல் தோன்றும் விளைவுகள் குறித்தும் கூறப்பட்டது. மேலும், துகளை வட்டத் தடத்தில் உட்செலுத்தும்போது கையாள வேண்டிய முறையையும், ஆற்றல் பெற்ற துகள்களை உதவிச்சுருள்கள் (*Auxillary Coils*) துணைகொண்டு வெளியேற்றும் முறையையும் கண்டோம்.

மேலும், எலெக்ட்ரான்கள் வட்டப்பாதையில் இயங்கும்போது கதிர்வீச்சிஞல் ஆற்றல் இழக்கும் என்று கண்டோம். இந்த ஆற்றல் இழப்புத்தான் பீட்டாட்ரான் இயக்கத்தைக் குலைப்பதாக உள்ளது. இக் கதிர்வீச்சுஇழப்பு, ஆரத்துடன் எதிர்விகிதத்தில் உள்ளதால் ஆரம் மிகுந்த, பெரும்வட்டப் பொறிகளைப் பயன்படுத்துவதன் மூலம் இவ்விழப்பை விலக்கலாம். ஆனுல், இத்தகு பொறிகளில் காந்தப் புலத்தை உருவாக்கப் பெருமளவு காந்தம் தேவைப்படுவதால் செலவு அதிகமாகும். எனவே, வேறு வழிமுறைகளைப் பற்றிய சிந்தனை தோன்றியது. பீட்டாட்ரான் தத்துவமும், சைக்ளோட் ரானின் காந்த ஒத்திசைவு தத்துவமும் இணைந்த, 'சிங்க்ரோட்ரான்' என்னும் புதிய பொறி உருவானது.

8. ஏற்றமிகு பொறிகள்

8.1. முன்னுரை

பேராற்றல் முடுக்கிகளின் வரலாற்றில் லாரன்ஸ், கெர்ஸ்ட், வெக்சலர், மாக்மில்லன் ஆகிய ஐவரின் பங்கும் மிக முக்கியமானதாக விளங்குகின்றது. லாரன்ஸ் கண்ட ஒத்திசைவு தத்துவம், கெர்ஸ்ட் செர்பரின் பீட்டாட்ரான் அலைவிற்குரிய விளக்கங்கள், வெக்சலர் மாக்மில்லனின் கலைக்கோண நிலைப்பாட்டுத் தத்துவம் ஆகிய மூன்றும் அணுப்பொறியியலில், பெருந்திருப்பங்களை உருவாக்கின. அணுக்கரு மாற்றங்களைத் தூண்டத் தேவைப்படும் துகள்களை பேராற்றல் பெறச் செய்யும் முடுக்கிகளின் அமைப்பைச் சீரமைக்க வேண்டிய சூழ்நிலை ஏற்பட்டது. எனவே, மேற்சொன்ன மூன்று தத்துவங்களையும் செயல் படுத்திப் பேராற்றல் முடுக்கிகள் உருவாக்கப்பட்டன. சைக்ளோட் ரானில் சுருள்பாதையில் இயங்கும் துகள்கள் காந்த ஒத்திசைவுத் தத்து வத்தால் ஆற்றல் ஈட்டின. பீட்டாட்ரானிலோ, கலைக்கோண நிலைப் பாடுடைய ரேடியோ அதிர்வெண் முடுக்கத்தால் மாறு ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் இயங்கி எலெக்ட்ரான்கள் ஆற்றல் பெருக்கின. இவ்விரு தத்துவங்களையும் இணைத்துப் புதுமையான பொறியொன்றை அமைக்க அறிவியலாளர்கள் முயன்றனர். பிற முடுக்கும்பொறிகளில் இருந்த குறைகள் யாவும் விலக்கப்பட்டு, பன்மடங்கு ஆற்றல்பெற வழி வகுத்த இந்தச் சிங்க்ரோட்ரானை ஏற்றமிகு பொறி என அழைக்கலாம் அன்றோ ?

இத்தகைய, ஏற்றமிகு சிங்க்ரோட்ரானின் அமைப்பையும், செயல்படும் முறையையும், இந்த அத்தியாயத்தில் காண்போம். இப் பொறியுள் செலுத்தப்பெறும் துகள்கள் உரிய ஆற்றல் பெற, துகளின் கோண அதிர்வெண்ணுக்கும் அலைவானின் ரேடியோ அதிர்வெண்ணுக்கும் இடையே, இசைவு நீடிக்கவேண்டு மாதலால்,

அந்த இசைவுபற்றி முதற்கண் கூறப்படும். இந்த இசைவுக்குரிய தொடர்பிலிருந்து பொறியின் செயல்பாட்டிற்கான சில அளபுருபுகளைத் தீர்மானிப்பது எளிதாகும். இப் பொறியும் ஒரு மென்குவிப்புப் பொறியாதலால், ஆயத்திசை நிலைப்பாட்டையும், ஆரத்திசை நிலைப் பாட்டையும் கருதவேண்டியுள்ளது. மேட்ரிக்ஸ் (*Matrix*) கணிதவியல் முறை இதற்குப் பெருந்துணையாக நிற்கும்.

பீட்டாட்ரான் அலைவுகளினால் தோன்றக்கூடிய ஒத்திசைவு விளைவுகளை விலக்கவேண்டிய வழிமுறை குறித்தும், புலஎண் இதற்கான விளக்கம் தர எந்த அளவில் துணைநிற்கும் என்பதையும், காண்போம். இத்தகு பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் வீச்சின் காரணமாக வெற்றிட அறையின் அமைப்பு எவ்விதம் அமைகிறது என்பதையும், உட்செலுத்தப்படும் துகள் கற்றையின் ஆற்றலைப் பொறுத்து இறுதிப் பெருமஆற்றல் எவ்விதம் அமையக்கூடும் என்பதையும் ஆராய்வோம்.

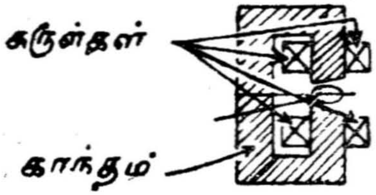
இறுதியாக, எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரானுள் எலெக்ட்ரான் இயங்கும்போது, அதன் ஆற்றலில் ஏற்படக்கூடிய மாறுதல்கள் எத்தகையன என்பது கூறப்படும்.

8.2. அமைப்பும் இயக்கமும்

சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் காந்தப்புலம் மாறிலியாக உள்ளது எனவும், ஆற்றல் பெருகப்பெருகத் துகள்கள் மையத்திலிருந்து சுருள் பாதையில் புறஞ்செல்லும் எனவும் கண்டோம். ஆனால், சிங்க்ரோட்ரானிலோ காந்தப்புலம் மாறிலியன்று. மேலும், இப் பொறியில் மாறுஆரமுடைய வட்டப்பாதையில் இயங்கி, துகள்கள் தம் ஆற்றலைப் பெருக்கிக் கொள்ளும். இப் பொறியில் செயல்படும் ரேடியோ அதிர்வெண் மின்புலமும் உரிய முறையில் மாற்றப்பட்டுக் கொண்டே இருக்கும். புரோட்டான்களை இயக்கப் பயன்பட்ட இந்தப் பொறி **புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரான்** எனப்பட்டது.

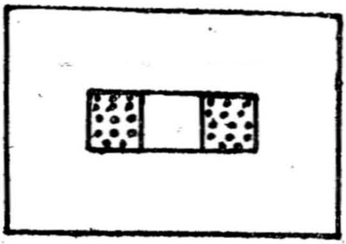
சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானிலும் நிறைமிகு துகள்களை முடுக்கலாம். ஆனால், காந்தத்தினால் ஏற்படும் செலவைக் கருதும் போதுதான் வேறு பொறிகளின் தேவை புலனாகும். சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் சிக்கனமான முறையில் *BeV* ஆற்றல் வரை துகள்களை முடுக்க முடியும். இப் பொறியில் மாறுஆரமுடைய வட்டத் தடத்தில் துகள்கள் இயங்குவதால், வட்டத் தடத்தின் எல்லையில் மட்டுமே காந்தப்புலம் செயல்பட்டால் போதுமானது. ஆகவே, இப் பொறியில் உள்ள காந்தங்கள் வளையவடிவமாக அமைகின்றன. இதனால், இப்பொறியில் பயன்படும் வெற்றிட அறை வளைபந்து

வடிவம் பெற்றிருக்கும். இவ் வெற்றிட அறையில் செயல்படும் மின் புலம்தான் துகள்களை முடுக்குகின்றது. இப் பொறியில் பயன்படும் காந்தம் இரண்டு மோதிரவடிவத் துருவத் துண்டுகளை உடையது. காந்தச் சுற்றுனது (*Magnetic Circuit*) ஓர் இரும்புச் சுவரால் மூடப்பட்டிருக்கும். எனவே, இந்தக் காந்தம் பார்ப்பதற்கு C வடிவில் இருக்கும். இக் காந்தத்தின் அமைப்பை, படம் 8.1 -ல் காணலாம்.



படம் 8.1 C -வடிவக் காந்தம்

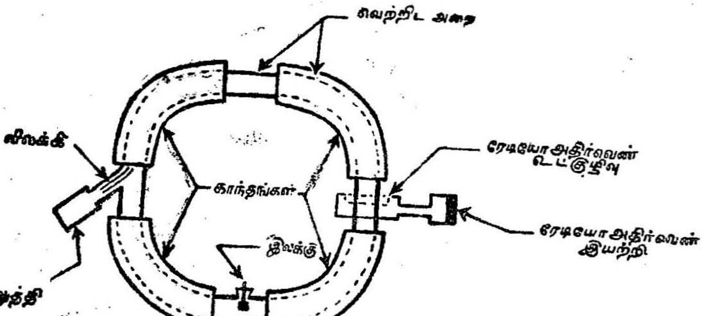
காந்தச் சுருள்கள் (*Magnet Coils*) குறைந்த அதிர்வெண் மாறு மின்னேட்டத்தால் ஊட்டம் பெறுவதால், காந்தப்புலமும் மாறு மின்னேட்டத்தின் இயல்பிற்கேற்ப அலேவுறும். ஆகவே *B* உயருகின்ற (*Rising*) காலம் மட்டுமே துகள்கள் முடுக்கம்பெற உகந்ததாகும். C வடிவக் காந்தங்களைத் தவிர, படம் 8.2 -ல் உள்ளவாறு அமைந்த *H* வடிவக் காந்தங்களும் பயன்படுகின்றன. ஆனுல் C வடிவக் காந்தங்களைப் பயன்படுத்துவதால் வெற்றிட அறை, சுருள்கள் முதலியன உள்ளே வைப்பதற்கும் வெளியே எடுப்பதற்கும் வசதியாக இருப்பதால், அவையே பயனுள்ளவை. இருப்பினும், சமச்சீரான H வடிவக் காந்தங்களைவிட C வடிவக் காந்தங்கள் ஓரளவு திறன் குறைந்தவை.


படம் 8.2 H - வடிவக் காந்தம்

பெரும்பாலான பொறிகளில் C வடிவக் காந்தங்களே பயன்படுத்தப் படுகின்றன. பர்மிங்காம் (*Birmingham*), சாக்ளே (*Saclay*) முதலிய இடங்களில் உள்ள பொறிகளில் பயன்படுத்தப்படும் காந்தங்கள் C வடிவமுடையன.

நடைமுறையில் பயன்படும் சிங்க்ரோட்ரான்களில் C வடிவக் காந்தங்களுடன், புல ஆதிக்கமற்ற நேர்பகுதிகளும் (*Straight Sections*) உள்ளன. இத்தகு அமைப்புடைய சிங்க்ரோட்ரான் தன் வடிவம் காரணமாகப் பந்தயப்பாதைச் சிங்க்ரோட்ரான் (*Race-track Synchrotron*) எனப்படும். இந்த நேர்பகுதிகள் அமைந்துள்ள காரணத்தால் பல துணை அமைப்புகளைப் பொருத்துவது எளிதாகின்றது. படம் 5.3 -ல் காட்டப்பட்டுள்ள சிங்க்ரோட்ரானில் நான்கு நேர்பகுதிகளும், நான்கு காந்தப் பகுதிகளும் உள்ளன. ஒரு

நேர்பகுதியில் ரேடியோ அதிர்வெண் உட்குழிவும், மற்றொன்றில் இலக்கும் உள்ளது. மூன்றும் நேர்பகுதியில், நேரியல் பொறியிலிருந்து வரும் துகள்களைச் செலுத்தப் பயன்படும் உள்வாங்கி (*Inflector*) உள்ளது.



படம் 8.3 சிங்க்ரோட்ரானின் அமைப்பு

உள்வாங்கியில் நுழையும் துகள்கள், வெற்றிட அறையினுள் தொடுவியலாகச் (*Tangentially*) செலுத்தப்படுகின்றன. பின்னர், இந்தத் துகள்கள் ரேடியோ அதிர்வெண் மின்புலத்தால் முடுக்கப் படுகின்றன. ரேடியோ அதிர்வெண் அலைவானின் கோண அதிர்வெண் (*Angular Frequency*) ω_{rf} எனக் குறிப்போம். எனவே, அதற்குரிய அலைவுநேரம் (*Period*) $2\pi/\omega_{rf}$ ஆகும். துகள் ஒரு சுற்றை முடிக்கத் தேவையான அலைவுநேரமும், $2\pi/\omega_{rf}$-ம் சமமானால்தான் துகள் முடுக்கம் பெறும். துகளின் ஆற்றல் பெருகப்பெருக அதன் சுற்று நேரம் குறையுமாதலால் முடுக்கந்தரும் ரேடியோ அதிர்வெண்ணும் அதற்கேற்றவாறு மாற்றப்படவேண்டும். இல்லையெனில், இசைவுநிலை நீடிக்காது.

மிக உயர்ந்த ஆற்றல் எல்லைகளில் குறைந்த செலவில் செயல்படும் பொறி சிங்க்ரோட்ரானாகும். இரு வாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற (*Alternate Gradient Synchrotron*) பொறிகள் உருவாகக் காரணமாக அமைந்ததும் இந்தப் பொறிதான். முதலில் கூறியவாறு, காந்த ஒத்திசைவு, தடநிலைப்பாடு, கலைக்கோண நிலைப்பாடு மூன்றும் ஒருங்கிணைந்து செயல்படும் பொறி சிங்க்ரோட்ரான் ஆகும். இப் பொறியில் செயல்படும் காந்தப்புலப் பண்பின் காரணமாக இந்தப் பொறியை மென்குவிப்புச் சிங்க்ரோட்ரான் (*Weak Focussing Synchrotron*) என்றும் அழைப்பர். இனி, இப் பொறியின் இயக்கத்திற்கான கோட்பாடுகளைப் பெறுவோம்.

8.3. சிங்க்ரோட்ரானில் நிலவும் ஒத்திசைவு

இப் பொறியில், துகள்களைக் குறிப்பிட்டதொரு மாறு ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் இயக்க, காந்தப் புலத்தினுல் ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும், குவித்தல் உருவாக்கப் படவேண்டும். எனவே, பீட்டாட்ரானில் செயல்படுவது போன்றே, தடத்தின் வழியே குறைகின்ற காந்தப்புலம் இப்பொறியிலும் செயல்பட வேண்டும். எனவே, சிங்க்ரோட்ரான்கள் மென்குவிப்புப் பொறிகள் எனப்படும். புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரானுள் இயங்கத் துகளின் சுற்று அதிர்வெண்ணும், ரேடியோ அதிர்வெண் அலைவானின் அதிர் வெண்ணும் இசைவு பெறவேண்டும் எனக் கண்டோம். இனி, ரேடியோ அதிர்வெண்ணுக்கும் துகளின் இயல்புக்கும் உள்ள தொடர்பைப் பெறுவோம்.

'q' மின்னூட்டமும் M_0 ஓய்வுநிலை நிறையுமுடைய துகள் v வேகத்துடன், r ஆரமுடைய தடத்தில் இயங்குவதாகக் கொள் வோம். காந்தப் புலமதிப்பு B எனக் கொண்டால், துகள்மீது செயல் படும் லொரெண்ட்ஸ் விசை Bqv ஆனது Mv^2/r க்குச் சமம் என்றறி வோம். இதனுல் துகளின் கோண அதிர்வெண்,

$$\omega = \frac{Bqc^2}{E} \tag{8.1}$$

என்றும் அறிவோம்.

அலைவானின் அதிர்வெண் ω_{rf} எனில், இசைவு நிலவுவதற்கு

$$\omega \propto \omega_{rf} \tag{8.2}$$

ஆகவேண்டும். ஆகவே, $\omega = k\,\omega_{rf}$ (8.3)

அல்லது,
$$\frac{Bqc^2}{E} = k\,\omega_{rf} \tag{8.4}$$

ஆகும். வளைய வடிவக் காந்தம் பயன்படுத்தப்படும் இப் பொறியில் துகளியங்கும் தடஆரம் r மாறிலியாக அமையவேண்டும்.

$$\therefore\ r = \text{ஒரு மாறிலி}$$

அல்லது,
$$\frac{v}{\omega} = \text{ஒரு மாறிலி} \tag{8.5}$$

சமன்கள் 8.3, 8.5 லிருந்து,

$$\frac{v}{\omega_{rf}} = \text{ஒரு மாறிலி}$$ எனப் பெறலாம். (8.6)

ஆகவே,
$$\omega_{rf}(t) \propto v(t) \tag{8.7}$$

ஆகும். அதாவது, அலைவானின் அதிர்வெண்ணனது துகளின் வேகத்துடன் நேர் விகிதத்திலிருக்கிறது என்று அறியலாம்.

இனி, $\omega = \frac{v}{r}$

ஆதலால், $\omega = c \cdot \frac{v/c}{r}$

$$= c \cdot \frac{\beta}{r}$$

$$= \frac{c \cdot \left(\frac{E^2 - E_0^2}{E^2}\right)^{\frac{1}{2}}}{r} \quad \left[\because \beta = \left(\frac{E^2 - E_0^2}{E^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$

$$= \frac{c}{r} \frac{E_0\left(\frac{E^2 - E_0^2}{E_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}}{E}$$

அல்லது, $$\omega = \frac{\frac{c}{r}\left(\frac{E^2}{E_0^2} - 1\right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{E}{E_0}} \qquad (8.8)$$

ஆகும். $\frac{E}{E_0} = \gamma$ எனில்,

$$\omega = \frac{c}{r}\frac{(\gamma^2-1)^{\frac{1}{2}}}{\gamma}$$

ஆகும்.

$$\therefore \omega^2 = \frac{c^2}{r^2}\left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)$$

எனவே, $$\frac{\omega^2 r^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\gamma^2} \qquad (8.9)$$

என்றாகும். சமன்கள் 8.1, 8.9 -லிருந்து,

$$\frac{q^2c^4B^2}{E^2} \cdot \frac{r^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

என்று பெறலாம்.

$$\therefore \frac{r^2q^2c^2B^2}{\gamma^2 E_0^2} = \frac{\gamma^2-1}{\gamma^2}$$

எனவே, $$\gamma^2 = 1 + \left(\frac{rqcB}{E_0}\right)^2 \qquad (8.10)$$

சமன் 8.4 -லிருந்து, $\omega_{rf} = \dfrac{qc^2B}{k\gamma E_0}$ என அறிவோம்.

$$\therefore\ \omega_{rf} = \frac{qc^2B}{k\,E_0} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{r\,q\,c\,B}{E_0}\right)^2}}$$

$$= \frac{qc^2B}{k\,E_0} \times \frac{E_0}{qcr}\left\{\frac{1}{\sqrt{B^2 + \left(\dfrac{E_0}{qcr}\right)^2}}\right\}$$

ஆகவே,

$$\omega_{rf} = \frac{cB}{kr} \times \frac{1}{\sqrt{B^2 + \left(\dfrac{E_0}{qcr}\right)^2}} \qquad (8.11)$$

ஆகும். சமன் 8.11 -லிருந்து அலைவானின் அதிர்வெண்ணுக்கும் பொறியின் அளபுருகளுக்கு மிடையேயான தொடர்பை அறியலாம். இச்சமன்பாடு நிறைவு பெற்றால்தான், துகள் உரிய ஆற்றலைப் பெற முடியும். மாறு ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் துகளை வழிப்படுத்தக் காந்தப்புலம் உயர்வதால் சமன் 8.11 -ல் உள்ள வலப்பக்கக் கோவை மாறுபடும். எனவே, இசைவு நீடிக்க வேண்டுமெனில், அலைவானின் அதிர்வெண்ணும் மாற்றப்படவேண்டும். இச்சூழ்நிலை வெற்றிகரமாக நிறைவேற்றப்படுமானால், துகளின் இயக்கம் சீர்மை பெறுவதுடன், அதன் ஆற்றல்வளமும் பெருகும். இனித் துகளின் வட்டத்தடம் ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும், நிலைப்பாடு பெற எத்தகைய சூழ்நிலை நிலவவேண்டும் எனக் காணலாம்.

8.4. தட நிலைப்பாடு

ω -அதிர்வெண்ணோடு சுழலும் துகளானது ஆயத்திசை, ஆரத்திசை ஆகிய இருதிசைகளிலும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கு உட்படும் என்பதை அறிவோம். இனி, புலஎண் n, ஆயத்திசையில் தடப்பெயர்ச்சி z எனில், கெர்ஸ்ட் செர்பர் சமன்பாடு,

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \omega^2 nz = 0 \qquad (8.12)$$

என்றறிவோம். v -வேகத்துடன் இயங்கும் துகள் t நேரத்தில் கடந்த தூரம் L எனில், $L = vt$ ஆதலால்,

$$\frac{d^2z}{dL^2} + \frac{n}{r^2} z = 0 \qquad (8.13)$$

என்றாகும். இந்தச் சமன்பாட்டிற்குரிய பொதுத்தீர்வு

$$z = A \cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} L}{r}\right) + B \sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} L}{r}\right) \qquad (8.14)$$

ஆகும். மேலும், சரிவு (*Slope*)

$$\frac{dz}{dL} \equiv z' = -\frac{n^{\frac{1}{2}}}{r} \text{ A } Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} L}{r}\right) + \frac{n^{\frac{1}{2}}}{r} \text{ B } Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} L}{r}\right) \qquad (8.15)$$

எனப் பெறலாம்.

தொடக்க நிலையில் $L = L_1 = 0$ ஆகும். மேலும், இடப் பெயர்ச்சி $z = z_1$, சரிவு $z' = z_1'$ எனில், சமன்கள் 8.14, 8.15 லிருந்து

$$z_1 = \text{A}$$

எனவும்,

$$z_1' = 0 + \frac{n^{\frac{1}{2}}\text{B}}{r} \qquad (8.16)$$

எனவும் பெறலாம். $\therefore \text{ B} = \frac{rz'_1}{n^{\frac{1}{2}}}$

இனி, **A**, B இவற்றின் மதிப்புகளைச் சமன் 8.14 -ல் பதிலீடு செய்ய

$$z = z_1 \, Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} L}{r}\right) + \frac{rz_1'}{n^{\frac{1}{2}}} Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} L}{r}\right) \qquad (8.17)$$

என்றாகும்.

காந்தப் பகுதியொன்றில் துகளியங்கும் தடத்தின் நீளம் m எனில் ($L = L_2 = m$), இப் பகுதியின் முடிவில் தடத்தின் இடப் பெயர்ச்சி,

$$z_2 = z_1 \, Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) + \frac{r}{n^{\frac{1}{2}}} z_1' \, Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) \qquad (8.18)$$

ஆகும். எனவே, சரிவு

$$z_2' = -\frac{n^{\frac{1}{2}} z_1}{r} Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) + z_1' Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) \qquad (8.19)$$

ஆகும்.

சமன்கள் 8.18 -ஐயும் 8.19-ஐயும் மேட்ரிக்ஸ் (*Matrix*) களால் குறிப்போமெனில்,

$$\begin{pmatrix} z_2 \\ \\ z'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cos\,\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r} & \frac{r}{n^{\frac{1}{2}}} Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) \\ -\frac{n^{\frac{1}{2}}}{r} Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) & Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ \\ z_1' \end{pmatrix} \qquad (8.20)$$

எனப் பெறலாம்.

முதல் காந்தப் பகுதியை விட்டு வெளிவந்த துகள் காந்தப் புலமற்ற நேர்ப்பகுதியில் இயங்கும் என்பதை நாமறிவோம். இந்த நேர்ப்பகுதியின் தொடக்கத்தில் இடப்பெயர்ச்சியும், சரிவும் முறையே z_2, z'_2 ஆகும். நேர்ப்பகுதியின் தொடக்கத்திலும் முடிவிலும், சரிவு ஒரே மதிப்பையே பெற்றிருக்கும். நேர்ப்பகுதியின் இறுதியிலோ, இடப்பெயர்ச்சி மட்டும் அதிகரித்திருக்கும். இந்த நேர்ப்பகுதியின் நீளம் s எனில், துகள் நேர்ப்பகுதியில் இயங்கி, முழுநீளத்தையும் கடந்த பின்னுல் அடையும் இடப்பெயர்ச்சி,

$$z_3 = z_2 + s\, z'_2 \tag{8.21}$$

ஆகும். ஆகவே, சரிவு

$$z_3' = 0 + z'_2 \tag{8.22}$$

ஆகும். இவற்றையும் மேட்ரிக்ஸ்களால் குறிப்போமெனில்,

$$\begin{pmatrix} z_3 \\ z_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_2 \\ z'_2 \end{pmatrix} \tag{8.23}$$

எனப் பெறலாம்.

இனி, காந்தப் பகுதியொன்றும் நேர்ப்பகுதி ஒன்றும் இணைந்த பகுதி ஒரு கூறு (*Sector*) எனக் கொண்டால், முன்னர் பெற்ற z_3-ம் z'_3-ம், முறையே ஒரு கூறின் முடிவில் ஏற்படும் இடப் பெயர்ச்சியையும் சரிவையும் குறிக்கின்றன.

சமன் 8.20, 8.23 இரண்டையும் இணைத்து,

$$\begin{pmatrix} z_3 \\ z'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathrm{Cos}\left(\dfrac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) & \dfrac{r}{n^{\frac{1}{2}}} \mathrm{Sin}\left(\dfrac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) \\ -\dfrac{n^{\frac{1}{2}}}{r} \mathrm{Sin}\left(\dfrac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) & \mathrm{Cos}\left(\dfrac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} \tag{8.24}$$

என்று பெறலாம். சமன் 8.24 - லிருந்து, தொடக்கத்தில் இடப்பெயர்சி z_1 - ஆகவும், சரிவு z'_1 - ஆகவும் பெற்றிருந்த துகள், காந்தப் பகுதி யொன்றையும் நேர்ப்பகுதி யொன்றையும் கடந்தபின், இடப்பெயர்ச்சி z_3 ஆகவும், சரிவு z'_3 ஆகவும் பெறுகின்றது என அறியலாம்.

மேட்ரிக்ஸ் பெருக்கல் முறையினுல் கோவை 8.24 ஐ

$$\begin{pmatrix} z_3 \\ z'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z'_1 \end{pmatrix}$$

$$= \mathbf{M} \begin{pmatrix} z_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} \qquad (8.25)$$

என்று எழுதலாம். இக் கோவையில்,

$$Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) - \frac{sn^{\frac{1}{2}}}{r} Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) = M_{11}$$ எனவும்,

$$\frac{r}{n^{\frac{1}{2}}} Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) + s\, Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) = M_{12}$$ எனவும்,

$$-\frac{n^{\frac{1}{2}}}{r} Sin\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) = M_{21}$$ எனவும்,

$$Cos\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} m}{r}\right) = M_{22}$$ எனவும்,

குறிக்கப் பெற்றுள்ளன. மேலும், $\begin{pmatrix} M_{11} & M_{21} \\ M_{12} & M_{22} \end{pmatrix}$ என்ற மேட்ரிக்ஸ் $\mathbf{M}$ எனக் குறிக்கப் பெற்றுள்ளது.

தடம் அடைந்த இடப் பெயர்ச்சியையும் சரிவையும், zz' தளத்தில் புள்ளியொன்ருல் குறிப்போமெனில், தோற்றுவாயிலிருந்து இந்தப் புள்ளியுள்ள தூரத்தை Z என்ற வெக்டாரால் (*Vector*) குறிக்கலாம். எனவே, சமன் (8.25) -ஐ

$$Z_3 = M\, Z_1$$

என எழுதலாம். ஆகவே s நீளமுள்ள ஒரு கூறில் துகளின் இயக்கத்தை

$$Z_s = M\, Z_1 \qquad (8.26)$$

எனக் குறிக்கலாம். இதைப் போன்ற பல கூறுகளைக் கொண்டதே சிங்க்ரோட்ரான் ஆகும். இனி, இரண்டாவது கூறில் துகளின் இயக்கத்தைக் கருதுவோமெனில், இடப்பெயர்ச்சி,

$$Z_{2s} = MZ_s \qquad (8.27)$$

எனவே,

$$Z_{2s} = M\,(MZ_1)$$
$$= M^2 Z_1 \qquad (8\ 28)$$

ஆகும்.

சிங்க்ரோட்ரானில் மொத்தம் N கூறுகள் இருப்பதாகக் கொண்டால், துகள் முழுச் சுற்றொன்றை முடிக்கும் போது N கூறுகளைக் கடந்து இருப்பதால் $Z_{NS} = M^N Z_1$ ஆகும்.

எடுத்துக் காட்டாக துகளொன்று 10^4 சுற்றுகள் சுற்றியபின்,

$$Z_{\text{இறுதி}} = M^{10^4} Z_1 \tag{8.29}$$

ஆகும். ஆனால், இவ்விதம் மேட்ரிக்ஸ் பெருக்கல் முறையைப் பயன் படுத்தி Z இறுதியைத் தீர்மானித்தல் எளிதன்று. ஆகவே, பிறிதொரு கணித உத்தியைக் கொள்வோம்.

Z என்ற வெக்டாரை M என்ற மேட்ரிக்ஸால் பெருக்கினால் கிடைக்கும் MZ என்ற வெக்டார் Z என்ற வெக்டாரிலிருந்தும மதிப்பில் மட்டுமே மாறுபடும். எனவே,

$$MZ = \lambda Z \tag{8.30}$$

எனக் குறிக்கலாம். ஆகவே Z வெக்டாரின் கூறுகள் z, z' ஆதலால்,

$$\left.\begin{aligned} M_{11}z + M_{12}z' &= \lambda z \\ M_{21}z + M_{22}z' &= \lambda z' \end{aligned}\right\} \tag{8.31}$$

ஆகும். எனவே,

$$\left.\begin{aligned} (M_{11}-\lambda)z + M_{12}\,z' &= 0 \\ M_{21}\,z + (M_{22}-\lambda)z' &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{8.32}$$

ஆகும். இனி, z, z' ன் மதிப்புகள் சுழியத்தை அடையாது இருக்க வேண்டுமெனில், அணியம் (*Determinant*),

$$\begin{vmatrix} M_{11}-\lambda & M_{12} \\ M_{21} & M_{22}-\lambda \end{vmatrix} = 0 \tag{8.33}$$

ஆகவேண்டும். எனவே,

$$(M_{11}-\lambda)(M_{22}-\lambda) - M_{12}M_{21} = 0$$

$$\therefore M_{11}M_{22} - M_{11}\lambda - M_{22}\lambda + \lambda^2 - M_{12}M_{21} = 0$$

$$\therefore \lambda^2 - (M_{11}+M_{22})\lambda + (M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}) = 0 \tag{8.34}$$

இச் சமனில், M_{11}, M_{22}, M_{21}, M_{12} — இவற்றிற்குரிய மதிப்புகளைத் தருவோமெனில் $(M_{11}\ M_{22} - M_{12}\ M_{21})$ என்ற கூறின் மதிப்பு '1' ஆகும்.

$$\text{எனவே } \lambda^2 - (M_{11} + M_{22})\lambda + 1 = 0 \qquad (8.35)$$

ஆகும். இச் சமனிலிருந்து சமன் 8.30 நிறைவுபெற λ-ன் மதிப்புகள், மேட்ரிக்ஸ் M- ன் முதன்மை மூலைவிட்டக்கூறுகளின் (*Trace*) கூட்டுத் தொகையால்தான் நிர்ணயிக்கப்பட வேண்டும் என்றறியலாம். சமன் 8.35-லிருந்து λ - விற்கு

$$\lambda_a = \tfrac{1}{2}(M_{11} + M_{22}) + \tfrac{1}{2}\left\{(M_{11}+M_{22})^2 - 4\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (8.36)$$

$$\lambda_b = \tfrac{1}{2}(M_{11} + M_{22}) - \tfrac{1}{2}\left\{(M_{11} + M_{22})^2 - 4\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (8.37)$$

என்ற இரு மதிப்புகளைப் பெறலாம். λ - விற்கு λ_a, λ_b என்ற இரு மதிப்புகள் இருக்கும் காரணத்தால், வெக்டார் Z - ம் இரு கூறுகளைப் பெறும். ஆதலால்,

$$Z = A Z_a + B Z_b \text{ என்று குறிக்கலாம்.}$$

துகள் ஒரு கூறில் இயங்கும் போது

$$MZ = AMZ_a + BMZ_b \qquad (8.38)$$

என்றாகும். எனவே N கூறுகளைக் கடந்த பின்னுல் ஏற்படும் இடப் பெயர்ச்சி

$$M^N Z = AM^N Z_a + BM^N Z_b \qquad (8.39)$$

ஆகும்.

அல்லது, சமன் 8.30 – ன் படி,

$$M^N Z = A(\lambda_a)^N Z_a + B(\lambda_b)^N Z_b \qquad (8.40)$$

ஆகும். இக் கோவையிலிருந்து, நிலைப்பாட்டிற்குரிய விதிகளைப் பெறலாம். λ_a, λ_b இவற்றின் மதிப்புகள் ஒன்றைவிட அதிகமானுல், ஒவ்வொரு கூறைத் தாண்டும் போதும் Z ன் மதிப்புகள் அதிகரிப்பதால், இடப்பெயர்ச்சி z, சரிவு z' ஆகிய இரண்டின் மதிப்புகளும் பெருகும். ஆயத்திசையில் இத்தகு விளைவுகள் நிகழ்வதால் தடம் நிலைப்பாடை இழக்கும் என்றறியலாம். ஆனுல், λ_a, λ_b இவற்றின் மதிப்புகள் ஒன்றைவிடக் குறைவாகவோ அல்லது ஒன்றுக்குச் சமமாகவோ இருக்குமானுல் Z மிக அதிகமாகப் பெருக வாய்ப்பில்லை. அதாவது, இடப் பெயர்ச்சி z, சரிவு z' இரண்டுமே அதிகரிக்க முடியாது. எனவே, தடம் நிலைப்பாடு அடையும். ஆகவே, ஆயத் திசை பீட்டாட்ரான் அலைவுகளால் தடநிலைப்பாடு குலையாமல் இருக்க λ_a, λ_b இவற்றின் மதிப்புகள் நிறுவப்படவேண்டும்.

சமன்கள் 8.36, 8.37 லிருந்து,

$$\lambda_a \lambda_b = 1 \qquad (8.41)$$

$$\lambda_a + \lambda_b = M_{11} + M_{22} \qquad (8.42)$$

என்று பெறலாம். சமன் 8.41 - லிருந்து, λ_a, λ_b இவற்றின் மதிப்புகளைப் பின்வருமாறு எழுதலாம்,

$$\lambda_a = e^{w}$$

$$\lambda^{b} = e^{-w}$$

இதில் w என்பது ஏதாவதொரு மதிப்புடைய எண்ணுகும்.

ஆதலால், $M^{N}Z = Ae^{Nw}Z_a + Be^{-N\omega}Z_b \qquad (8.43)$

ஆகும். w மெய் எண்ணுக (*Real Number*) இருக்குமெனில், கோவை 8.43 - ல் உள்ள ஏதாவதோர் அடுக்குக்குறி (*Exponential*) யின் மதிப்பு 1 - ஐவிட அதிகமாகும். இதன் பயனுக, தடம் நிலைப்பாடு பெறுதல் இயலாது என்றறியலாம். எனவே, w ஒரு கற்பனைக் கணிப்பளவையாகத்தான் (*Imaginary Quantity*) இருக்க வேண்டும்.

$$\therefore w = j\sigma \qquad (8.44)$$

எனக் குறிப்போம். இதில் $j = \sqrt{-1}$ ஆகும். மேலும் σ ஓர் மெய்—எண் (*Real Number*) ஆகும். எனவே,

$$\left.\begin{aligned}\lambda_a &= e^{j\sigma}\\ \lambda_b &= e^{-j\sigma},\end{aligned}\right\} \qquad (8.45)$$

எனவும், ... எனவும் பெறலாம்.

$$\therefore M^{N}Z = Ae^{jN\sigma}Z_a + Be^{-jN\sigma}Z_b \qquad (8.46)$$

சமன் 8.46 - ல் Z_a, Z_b ஆகிய இரு கூறுகளும் தொடக்க இடப்பெயர்ச்சி z_1 ஐயும் சரிவு z_1' - ஐயும் குறிக்கின்றன. n கூறுகளைக் கடந்தபின்னுல் துகளின் இடப்பெயர்ச்சியையும் சரிவையும் $M^{N}Z$ குறிக்கின்றது. கோவை 8.46 - ஐப் பின்வருமாறும் எழுதலாம்.

$$\begin{pmatrix} Z_N \\ Z'_N \end{pmatrix} = A\begin{pmatrix} Z_{1a} \\ Z'_{1a} \end{pmatrix} e^{jN\sigma} + B\begin{pmatrix} Z_{1b} \\ Z'_{1b} \end{pmatrix} e^{-j\sigma N} \qquad (8.47)$$

$$\therefore Z_N = AZ_{1a}\, e^{jN\sigma} + BZ_{1b}\, e^{-jN\sigma} \qquad (8.48)$$

மேலும், $Z'_N = AZ'_{1a}\, e^{jN\sigma} + BZ'_{1b}\, e^{-jN\sigma} \qquad (8.49)$

ஆகும். இடர்ப்பெயர்ச்சி Z_N மெய்யானது (*Real*) என்றறிவோம். ஆதலால், சமன் 8.48 ன் வலப்பக்கமும் மெய்யானதாக இருக்க வேண்டும். எனவே, BZ_{1b}, AZ_{1a} - ன் இணைக் கலப்பெண்ணுக

(*Complex Conjugate*) இருக்க வேண்டும். எனவே, p_1 - ம், q_1-ம் மெய் எண்கள் எனில்,

$$AZ_{1a} = p_1 + jq_1$$

எனவும்

$$BZ_{1b} = p_1 - jq_1$$

எனவும், குறிக்கலாம்.

எனவே, சமன் 8.48 - ஐ

$$Z_N = (p_1 + jq_2)\, e^{jN\sigma} + (p_1 - jq_1)\, e^{-jN\sigma}$$

என்று எழுதலாம்.

அல்லது,
$$Z_N = p_1 (e^{jN\sigma} + e^{-jN\sigma}) + jq_1 (e^{jN\sigma} - e^{-jN\sigma})$$

ஆகும். எனவே, $Z_N = 2p_1 \, Cos N\sigma - 2q_1 \, Sin N\sigma$

ஆகும். அல்லது,

$$Z_N = 2 (p_1^2 + q_1^2)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{p_1}{(p_1^2+q_1^2)^{\frac{1}{2}}} Cos N\sigma - \frac{q_1}{(p_1^2+q_1^2)^{\frac{1}{2}}} Sin N\sigma \right\}$$

என எழுதலாம். இதில், $\frac{p_1}{(p_1^2+q_1^2)^{\frac{1}{2}}}$ ஐ $Cos\theta_1$ எனக் குறிப்போமெனில்,

$$Z_N = 2 (p_1^2 + q_1^2)^{\frac{1}{2}} \left\{ Cos\theta_1 \, Cos N\sigma - Sin\theta_1 \, Sin N\sigma \right\}$$

ஆகும்.

$$Z_N = 2 (p_1^2 + q_1^2)^{\frac{1}{2}} Cos\, (\theta_1 + N\sigma) \qquad (8.50)$$

N கூறுகளைக் கடந்து முழுச்சுற்றொன்றை முடித்த துகளின் ஆயத்திசை இடப் பெயர்ச்சியை (*Axial Displacement*) கோவை 8.50 - லிருந்து பெறலாம். மேலும், அக் கோவையிலிருந்து ஆயத்திசையில் ஏற்படும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகள், கொசைன் அலைவுகள் (*Cosine Oscillations*) என்பதும் தெளிவாகும். எடுத்துக்காட்டாக, முதல் கூறின் தொடக்கத்தில் உள்ள இடப்பெயர்ச்சி,

$$z_1 = 2 (p_1^2 + q_1^2)^{\frac{1}{2}} Cos\, (\theta_1 + \sigma) \qquad (8.51)$$

ஆதலால், முதல்கூறைக் கடந்து முடிக்கும் தருணத்தில் அமையும் இடப்பெயர்ச்சி, $z_2 = 2 (p_1^2 + q_1^2)^{\frac{1}{2}} Cos\, (\theta_1 + 2\sigma)$ (8.52)

ஆகும். சமன்கள் 8.52 - ஐயும் 8.51ஐயும் ஒப்பு நோக்க, ஒரு கூறைக் கடந்ததும், துகள் அடைகின்ற கலைக்கோண மாறுபாடு (*Phase Change*) σ என்றறியலாம். இவ்வாறே, N கூறுகளைக் கடந்தபின் துகளின் சரிவு $z'_N = 2 (p_2^2 + q_2^2) Cos\, (\theta_2 + N\sigma)$ (8.53)

எனப் பெறலாம். இச் சமனில்

$$AZ_1{}'_a = p_2 + jq_2$$

$$BZ_1{}'_b = p_2 - jq_2$$

$$Cos\theta_2 = \frac{p_2}{\sqrt{p_2^2 + q_2^2}}$$

ஆகும்.

சமன் 8.53 - லிருந்தும், σ வானது கலைக்கோண வேறுபாட்டை குறிப் பதை அறியலாம். இனி, σ-ன் மதிப்பிலிருந்து நிலைப்பாட்டிற் குரிய விதிகளைப் பெறுவோம். சமன்கள் 8.42, 8.45 லிருந்து,

$$e^{j\sigma} + e^{-j\sigma} = M_{11} + M_{22} \qquad (8.5)$$

என்றறிவோம்.

$$\therefore Cos\sigma_z = \left(\frac{M_{11} + M_{22}}{2}\right) \qquad (8.55)$$

ஆகும். கலைக்கோண மாறுபாடு σ_z மெய்யானதாக இருந்தால்தான் λ_a, λ_b இவற்றின் மதிப்புகள் ஒன்றைவிட அதிகரிக்கா. மேலும், λ_a, λ_b ன் மதிப்புகள் ஒன்றைவிடக் குறைவாக இருந்தால்தான் ஆயத் திசைநிலைப்பாடு நிலவும் எனக் கண்டோம். ஆகவே, σ_z உண்மை யானதாக இருக்க $Cos\sigma_z$ - ன் மதிப்புக்கள் + 1 க்கும் 1 —க்கும் இடையே இருக்கவேண்டுமாதலால், $\left(\frac{M_{11} + M_{22}}{2}\right)$ - ன் மதிப்பு களும் + 1க்கும் – 1க்கும் இடையே அமையவேண்டும். அதாவது, ஆயத்திசை நிலைப்பாட்டிற்குரிய சூழ்நிலைக்கு $\left(\frac{M_{11} + M_{22}}{2}\right)$ - ன் மதிப்புகள் + 1க்கும் — 1க்கும் இடையே அமையவேண்டும் என்றறியலாம்.

பீட்டாட்ரான் அலைவுகளினால், ஒரு கூறில் (*Sector*) ஏற்படக் கூடிய கலைக்கோண மாறுபாடு σ_z ஆதலால், ஒரு சுற்றில் ஏற்படும் கலைக்கோண மாறுபாடு $N\sigma_z$ என்றறிவோம். ஆகவே, ஆயத்திசை பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் அதிர்வெண்,

$$\nu_z = \frac{N\sigma_z}{2\pi} \qquad (8.56)$$

ஆகும். இதைப் போலவே, ஆரத்திசையில் ஏற்படும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளினால் தோன்றும், ஆரத்திசை பீட்டாட்ரான் அதிர்வெண்,

$$\nu_x = \frac{N\sigma_x}{2\pi} \qquad (8.57)$$

ஆகும்.

இனி, மென்குவிப்புப் பந்தயப்பாதை சிங்க்ரோட்ரானின், வளைவு ஆரம் r எனவும், இதில் m நீளமுடைய N காந்தங்கள் உள்ளன எனவும், புல எண் n எனவும் கொள்வோம். ஆகவே,

$$2\pi r = Nm \qquad (8.58)$$

ஆகும். எனவே, சமன்கள் 8.55, 8.58 -லிருந்து,

$$Cos\ \sigma_z = Cos\left(\frac{2\pi n^{\frac{1}{2}}}{z}\right) - \frac{s\pi n^{\frac{1}{2}}}{mN}\ Sin\left(\frac{2\pi n^{\frac{1}{2}}}{N}\right) \tag{8.59}$$

என்ருகும். இவ்வாறே, ஆரத்திசை இயக்கத்தைக் கருத்தில் கொண்டால்,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 (1-n)\ x = 0$$

என்று கூறலாம். இதிலிருந்து, ஆரத்தி சையில் ஏற்படும் கலைக்கோண மாறுபாட்டை σ_x எனக் குறித்து

$$Cos\ \sigma_x = Cos\left(\frac{2\pi(1-n)^{\frac{1}{2}}}{N}\right) - \frac{s\pi(1-n)^{\frac{1}{2}}}{mN} Sin\left(\frac{2\pi(1-n)^{\frac{1}{2}}}{N}\right) \tag{8.60}$$

என்று பெறலாம். சமன்கள் 8.59, 8.60 -லிருந்து, $Cos\sigma_z$, $Cos\sigma_x$-ன் மதிப்புகள் பொறியின் அளபுருபுகளைச் சார்ந்திருப்பது புலனுகும். எனவே, ஆரத்திசை, ஆயத்திசை ஆகிய இரு திசைகளிலும் நிலைப்பாடு நிலவ $Cos\ \sigma_z$, $Cos\ \sigma_x$ ஆகியவற்றின் மதிப்புகள் + 1க்கும் – 1க்கும் இடையே அமையுமாறு பொறியின் அளபுருபுகளைத் தேர்ந்தெடுக்க வேண்டும்.

8.5. புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரானில் பீட்டாட்ரான் அலைவின் விளைவுகள்

மென் குவிப்புப் பொறிகளில் ஆரத்திசை நிலைப்பாடும் ஆயத்திசை நிலைப்பாடும் நிலவ, ஆரத்திசையில் குறைகின்ற காந்தப் புலம் இருக்க வேண்டும். எனவே, சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறிகளிலும் காந்தப்புலமானது இப்பண்பைப் பெற்றிருக்க வேண்டும். மேலும், மாரு ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் துகளியங்கும் காரணத்தால் இப் பொறியில் துகளின் ஆற்றல் பெருகப்பெருகக் காந்தப் புலம் B-ம் பெருக வேண்டும் எனவும் கண்டோம். இனி, காந்தத்தின் உள்ளே துகள் இயங்கும் இடைவெளியைத் தீர்மானிக்கும் போது மிகக் கவனமாக இருக்கவேண்டும். காந்தப் புலத்தின் சீரற்ற தன்மையாலும், இசைவுருத் துகள்களின் இயல்பிஞலும் தோன்றும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகள், கலைக்கோண அலைவுகள், இவற்றின் காரணமாகத் துகள்கள் காந்தத்தின்மேல் மோதி இழந்து போகாமல் காக்கப்பட வேண்டும். ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும், சீரான குவிப்பை உருவாக்கப் புலஎண்ணின் (n) மதிப்பு $0<n<+1$ என்று அமையவேண்டும். இந்தப் புலஎண்ணின் மதிப்புகள் துகள் இழப்பைத் தடுக்கப் பெரிதும் துணை செய்யும்.

புலஎண்ணின் மதிப்புகள் 1-க்கு நெருக்கமாக அமையுமானல் மேற்கண்ட காரணங்களால் ஏற்படும் இழப்பை விலக்கலாம். ஆனல், புலஎண்கள் இவ்வித மதிப்பைப் பெறும்போது ஒத்திசைவு விளைவுகள் தோன்றும் வாய்ப்புண்டு. ஆயத்திசை அலைவும், ஆரத்திசை அலைவும், ஒத்திசைவு பெறுவதுடன், துகளின் தடச்சுற்று அதிர்வெண்ணும் இத்துடன் இசைவுறுமெனில், அஞ்சத் தகுந்த, வீச்சு மிகுந்த, பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் தோன்றும். எனவே, ஆயத்திசை கோண அதிர்வெண் ω_z, ஆரத்திசை கோண அதிர்வெண் ω_x, துகளின் தடச்சுற்று அதிர்வெண் ω, ஆகிய மூன்றிற்கும் இடையே ஒத்திசைவு நிலவ வாய்ப்பளிக்கும் n -ன் மதிப்புகளை விலக்கவேண்டும். காட்டாக, $n = 1$ எனில் ஒரு வட்ட வடிவ காந்தத்தில்

$$\frac{\omega_z}{\omega} = 1:1$$

என்றமையும். மேலும், $n = 0{\cdot}8$

எனில், $$\frac{\omega_x}{\omega_z} = 1:2$$

ஆகும். மேலும், $n = 0{\cdot}5$ எனில்,

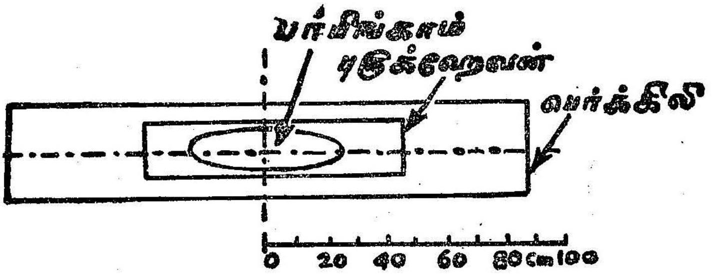
$$\frac{\omega_x}{\omega_z} = 1:1$$

என்ருகும். ஆகவே, இயன்றவரை இத்தகு ஒத்திசைவு விளைவுகளைத் தோற்றுவிக்கும் புலஎண் மதிப்பை விலக்க வேண்டும். இல்லையெனில், பெருமளவில் துகள்களை இழக்க நேரிடும். இதன் பயனுகப் புலஎண்ணின் மதிப்பு $0{\cdot}5 < n < 0{\cdot}8$ என்ற வரம்பினுள் அடங்குகின்றது. வட்டக் காந்தத்தைப் பயன்படுத்தாமல் பந்தயப்பாதைக் காந்தத்தைப் பயன்படுத்தினல், இத்தகு இழப்புகளை ஓரளவிற்கு விலக்கலாம்.

துகள் முடுக்கியின் ஆரம் பெருகப்பெருக, ஒத்திசைவை நிலவச் செய்தல் அரிதாகின்றது. காந்தப்புலம் B ஆனது, இரும்பின் தெவிட்டுதல் பண்பு காரணமாக ஒரு வரம்பிற்குள் அடங்குவதால் r/B சீராக அதிகரிக்கும். r/B அதிகரிக்குமானல் dB/dr -ல் ஏற்படும் சிறு பிழையும் n -ல் பெரும் மாற்றங்களைத் தோற்றுவிக்கும். ஆகவே, முடுக்கியின் ஆரம் பெருகப் பெருக இத்தகு இடர்ப்பாடுகள் தோன்றலாம். மேலும், காந்தப்புலம் நிலையாக இருந்தபோது n -ன் மதிப்புகளைத் தீர்மானித்தோம். ஆனல், சிங்க்ரோட்ரானில் இயங்கும் துகளின் ஆற்றல் பெருகப்பெருக, காந்தப்புலமும் அதிகரிக்க வேண்டுமாதலால், புலஎண் n -ன் இயக்க மதிப்புகள் (*Dynamic Values*) முன்னர்த் தீர்மானித்த புலஎண் மதிப்பிலிருந்து பெரிதும் வேறுபட்டிருக்கும். இத்தகு காரணங்களால் இப்பொறியில் உள்ள துருவ முனைகளின் பயன்தரக்கூடிய பரப்பு பெரிதும் குறைந்து விடுகின்றது.

8.6. வெற்றிட அறையின் அமைப்பு

நாம் கண்ட கலைக்கோண அலைவுகளும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளும் வெற்றிட அறையின் அளவுகளை நிர்ணயிக்கின்றன. படம் 8.4-ல் பர்மிங்காம், புருக்ஹேவன், பெர்க்கிலி முதலிய இடங்களில் உள்ள வெற்றிட அறைகள் ஒப்பிட்டுக் காட்டப் பட்டுள்ளன. அவற்றின் குறுக்கு வெட்டுத் தோற்றத்தையும் இப் படத்தில் காணலாம். துகள்கள் நீண்ட தூரம் இயங்குவதால் உயர்காற்றெழி (*High Vacuum*) வெற்றிட அறை தேவைப் படுகின்றது.



படம் 8.4 வெற்றிட அறைகளின் குறுக்கு வெட்டுத் தோற்றங்கள்

பெரும்பாலும், வெற்றிட அறையின் குறுக்கு வெட்டுத் தோற்றம் செவ்வக வடிவாகவே இருக்கும். காந்தங்களுக்கு இடையேயுள்ள வெளியில், வெற்றிட அறையை எளிமையாக நுழைக்க இந்த வடிவமே உகந்தாகும். பின்வரும் அட்டவணையில், குறிப்பிடத்தக்க சில பொறிகளில் உள்ள வெற்றிட அறையின் இயல்புகளைக் காணலாம்.

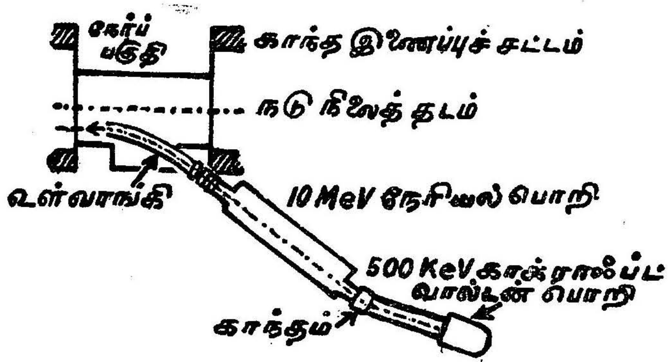
அட்டவணை 8.1

இடம்	பெரும ஆற்றல் (*BeV*)	வெற்றிட அறை உயரம் (மீட்டர்)	வெற்றிட அறை அகலம் (மீட்டர்)	குறுக்கு வெட்டுத் தோற்றம்
பர்மிங்காம்	1	0·15	0·55	நீள்வட்டம்
புருக்ஹேவன்	3	0·20	0·80	செவ்வகம்
பெர்க்கிலி	6.2	0·30	1·70	ஷ
மாஸ்கோ	10	0·40	2·00	ஷ
அர்கான்னே (Argonne)	12.5	0·11	0·38	ஷ
கான்பெரா (Canneberra)	10	0·22	0·22	வட்டம்
பிரின்ஸ்டன்	3	0·057	0·254	செவ்வகம்

இந்த அட்டவணையிலிருந்து, பெரும்பாலான இடங்களில் செவ்வகவடிவ அறைகளே பயன்படுவது புலனாகும். மேலும் 12·5 *BeV* இறுதி ஆற்றல் தரும் பொறியின், வெற்றிட அறையின் அளவை நோக்கும்போது, இவ்வளவு சிறிய வெற்றிட அறையில் துகள் இழப்பின்றி இயங்குமோ என்ற ஐயம் எழலாம். தடநிலைப்பாடு தத்துவம் வெற்றிகரமாக நிறைவேற்றப்படுமானால் இவ்விதம் அஞ்ச வேண்டியதில்லை.

8.7. துகளை உட்செலுத்தல்

துகள்களை உட்செலுத்தும் போது மிகக் கவனமாக இருக்க வேண்டும். பெரும் எண்ணிக்கையிலான துகள்களை, உரிய தடத்தில், உரிய தருணத்தில், உட்செலுத்த வேண்டும். உரிய ஆற்றல் பெற்றுள்ள துகள்கள் உட்செலுத்தியிலிருந்து, வெற்றிட அறையின் புறச்சுவருக்கு அருகில் உள்வாங்கி ஒன்றால் செலுத்தப் படுவதைப் படம் 5.8 - ல் காணலாம். உட்செலுத்தப்படும்



படம் 8.5 துகளை உட்செலுத்தல்

தருணத்தில், துகளின் அதிர்வெண், அலைவானின் அதிர்வெண் ணுடன் இசையுமானால், துகள் வட்டத்தடத்தில் இயங்கும் எனக்கண் டோம். உயர்ந்த ஆற்றலுடைய துகள்களை உட்செலுத்தினால் சிங்க் ரோட்ரானில் இத்தகு ஒத்திசைவு நிலவுமாறு செய்தல் எளிதாகும். ஆகவே, நேரியல்முடுக்கி போன்ற பொறிகளில் இயங்கி, வெளி வரும் துகள்களையே சிங்க் ரோட்ரானுள் செலுத்தல் மரபு. மேலும், காந்தப்புலத்தையும் துகளின்ஆற்றலுக்கு ஏற்ப அமைப்பதன் மூலம் சுழி மின்னோட்ட (*Eddy current*) விளைவுகளை விலக்கலாம். பின்வரும் அட்டவணையில், குறிப்பிட்ட சில இடங்களில் பயன்படும் உட்செலுத்திகளின் ஆற்றலைக் காணலாம்.

அட்டவணை 8.2

இடம்	உட் செலுத்தி	உட்செலுத்தப் படும் ஆற்றல் (*MeV*)	பெரும ஆற்றல் (*BeV*)
பர்மிங்காம்	——	0·46	1
புருக்ஹேவன்	வாண்டிகிராஃப்	3·5	3·2
பெர்க்கிலி	நேரியல் முடுக்கி	9·8	6·2
மாஸ்கோ	நேரியல் முடுக்கி	7·5	10
அர்கான்னே	நேரியல் முடுக்கி	50	12·5
கான்பெரா	சைக்ளோட்ரான்	8	10·6
பிரின்ஸ்டன்	வாண்டிகிராஃப்	3	3

உட்செலுத்தப்படும் துகள்கற்றை, உரிய முடுக்கம் பெற்ற பின்னர், வெற்றிட அறையின் உள்ளேயே அமைந்துள்ள இலக்கின்மேல் மோதும்படி செய்யப்படும். அதாவது, துகள்கள் தேவையான அளவு முடுக்கம்பெற்ற உடனே, ரேடியோ அதிர்வெண் மின்னழுத்தம் செலுத்துவது நிறுத்தப்பட்டு காந்தப்புலம் மட்டும் உயர்த்தப்படும். ஆகவே, துகள்கற்றை சுருள்பாதையில் இயங்கி இலக்கின்மேல் மோதும். இத்தகு கற்றை, மெசான் (*Meson*), ஹைபெரான் (*Hyperon*) போன்ற துகள்களைத் தோற்றுவிக்க வல்லது.

8.8. எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான் (Electron Synchrotron)

பீட்டாட்ரான் இயக்கத்தால், மாறு ஆரமுடைய வட்டப் பாதையில் இயங்கி எலெக்ட்ரான்கள் ஆற்றல் வளம்பெருக்கும் என்று கண்டோம். ஆனால், உயர்ந்த ஆற்றல் எல்லைகளில் எலெக்ட்ரான் ஈட்டும் ஆற்றல் கதிர்வீச்சால் குறைந்து விடும் எனக் கண்டோம். எனவே, பீட்டாட்ரானில் இயங்கும் எலெக்ட்ரானின் ஆற்றலை மேலும் பெருக்கமுடியாமல் போகின்றது. ஆகவே வேறு முறையைக் கையாண்டு எலெக்ரானின் ஆற்றலைப் பெருக்கவேண்டிய கட்டாயம் தோன்றியது. இந்த முயற்சியில் பிறந்ததே **எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான்** (*Electron Synchrotron*) ஆகும்.

எலெச்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான் அமைப்பும், பந்தயப் பாதை சிங்க்ரோட்ரானைப் போன்றதேயாகும். தடத்தில் அமைக்கப்பட்டுள்ள பல முடுக்கும் அமைப்புகளில் இயங்கி, எலெக்ட்ரான்கள் முடுக்கம் பெறுகின்றன. இந்த எலெக்ட்ரான்களை மாறா ஆரமுடைய வட்டத் தடத்தில் காந்தப் புலமென்று வழிப்படுத்துகின்றது. குறைந்த ஆற்றலோடு பொறியுள் நுழையும் எலெக்ட்ரானை வழிப்படுத்தச் செயல்படும் காந்தப்புலமும் அதிகரித்துக்கொண்டே யிருக்கும். இப்பொறியிலுள்ள மின்புல அதிர்வெண் ஒரே மதிப்புடையதாக வைக்கப்பட்டுள்ளது. இந்தப் பொறியிலும் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவ இசைவு உருவாக்கப்பட வேண்டும்

காட்டாக, 2 MeV ஆற்றலோடு பொறியினுள் இயங்கத் தொடங்கும் எலெக்ட்ரான்களைக் கருதுவோம். இவை, ஒளிவேகத்தை மிக விரைவிலேயே நெருங்க வல்லன. எனவே, எலெக்ட்ரான்கள் மீண்டும் மீண்டும் முடுக்கச் சாதனத்தை நாடினாலும், வேகத்தில் மாற்றம் ஏற்படாது. மாறா ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் எலெக்ட்ரான்கள் இயங்குகின்றன என்று கண்டோம். அவற்றின் நடுநிலைத் தட ஆரம் r_0 எனில் அதிர்வெண்,

$$f = \frac{c}{2\pi r_0} \qquad (8.61)$$

என்றறிவோம். துகள்கள் 2 MeV ஐ விட அதிக ஆற்றல் பெற்றாலும் இந்த அதிர்வெண் மாறாது, 'r_0'ஐ மீட்டரில் குறிப்போமெனில்

$$f = \frac{47{\cdot}8}{r_0}$$

ஆகும். 'f' — மாறிலியாக இருப்பதால், கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவ வேண்டுமாயின், மின்புல அதிர்வெண்ணும் மாறிலியாகவே இருக்கவேண்டும். உரிய தருணத்தில், முடுக்கச் சாதனத்தை நாடி ஆற்றல் பெருக்கும் இசைவுறு துகளின் கோண அதிர்வெண் ω_s எனில்

$$\omega_s = \frac{qBc^2}{E_s} \qquad (8.62)$$

ஆகும். சிங்க்ரோட்ரானில், துகளின் கோண அதிர்வெண்ணும் மாறிலியாகத்தான் இருக்க வேண்டுமாதலால், ஆற்றல் (E_s) அதிகரிக்க அதிகரிக்கக் காந்தப்புலமும் அதிகரிக்க வேண்டும் என அறியலாம். இத்தகு காரணங்களால் எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரானில் இயங்கும் எலெக்ட்ரான்கள் உரிய ஆற்றல்பெற மின்புல அதிர்வெண் மாறிலியாகவும், காந்தப்புலம் அதிகரிக்கக் கூடியதாகவும் அமைத்தல் மரபு.

எலெக்ட்ரான்கள் வட்டத்தடத்தில் இயங்கும்போது கதிர்வீச்சால் ஆற்றல் இழக்க நேரிடும் எனக் கண்டோம். ஆனால், இப்பொறியில் இவ்விதம் ஆற்றல் இழக்கும் எலெக்ட்ரான்கள் தம் கலைக்கோண நிலையையும் மாற்றிக் கொள்வதால், சிங்க்ரோட்ரான் அலைவுகளுக்கு உட்பட்டு ஆற்றலை ஈட்டும். மின் காந்தவியல் கோட்பாடுகளின்படி M நிறையும், q மின்னூட்டமும் உடைய எலெக்ட்ரான் 'r' ஆரமுடைய வட்டத்தடத்தில் T இயக்க ஆற்றலுடன் இயங்கும் போது, இழக்கும் ஆற்றல்

$$\triangle E_r = \frac{4}{3}\pi\frac{q^2}{r^2}\left(\frac{E}{Mc^2}\right)^4 \qquad (8.63)$$

ஆகும். இச் சமன்பாட்டில் q, E, M ஆகியவற்றிற்கு உரிய மதிப்புகளைத் தருவதுடன், E ஆனது MeV-லும், r-மீட்டரிலும் குறிக்கப் பெற்றால்,

$$\triangle E_r = \frac{8{\cdot}9\times 10^{-14} E^4}{r} \qquad (8.64)$$

ஆகும்.

முறையே 500 MeV இறுதி ஆற்றலும், 1·5 BeV இறுதி ஆற்றலுமுடைய இரு எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான்களைக் கருதுவோம். இரு பொறிகளிலும் எலெக்ட்ரான் அடைகிற ஆற்றலானது, அதன் ஓய்வுநிலை ஆற்றலைவிடப் பன்மடங்கு பெரிதாகும். எனவே, இறுதி ஆற்றல் $E \approx T$

என்று கூறலாம். $\therefore E \approx pc$

அல்லது, $E \approx Bqrc \qquad (8.65)$

ஆகும். இரு பொறிகளிலும் உள்ள காந்தப்புலம் B-ன் பெரும மதிப்பு (12 கிலோகாஸ்) 1·2 வெபர்/மீட்டர்^{2} எனக் கொண்டு, துகளியங்கும் தட ஆரத்தைத் தீர்மானிப்போம்.

B-ன் மதிப்பையும், முதல் சிங்க்ரோட்ரானில் E-ன் மதிப்பையும் கொண்டு சமன் 8.65- லிருந்து துகளின் தடஆரம் 1·39 மீட்டர் என்று பெறலாம். இவ்வாறே, இதே B-ன் மதிப்போடு இரண்டாம் பொறிக்குரிய E-ன் மதிப்பைக்கொண்டு, இரண்டாம் பொறியில் தடஆரம் 4·17 மீட்டர் எனப் பெறலாம். ஆகவே, எலெக்ட்ரான் முதல் பொறியில் இயங்கும்போது ஒரு சுற்றில் இழக்கும் ஆற்றல் 4 keV எனவும், இரண்டாம் பொறியில் ஒரு சுற்றில் இழக்கும் ஆற்றல் 107 keV எனவும் பெறலாம். இத்தகு இழப்புகளை விலக்க, முறையே, இதே மதிப்புள்ள மின்னழுத்தங்களை ஒவ்வொரு பொறியிலும் பயன்படுத்தலாம்.

8.9. குறிப்பிடத்தக்க சில சிங்க்ரோட்ரான்கள்

புருக்ஹேவனிலுள்ள புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரான் 3 *BeV* ஆற்றல் தர வல்லதாகும். கலிபோர்னியாவிலுள்ள பீவாட்ரான் (*Bevatron*) எனப்படும் புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரான் 10 *BeV* ஆற்றல் தர வல்லது. நேரியல் முடுக்கியிலிருந்து 10*MeV* ஆற்றலோடு வெளிவரும் துகள்கள், இந்தச் சிங்க்ரோட்ரானுள் இயங்கி 10 *BeV* ஆற்றலோடு வெளிவரும். 1·8 விஞடியிலேயே இந்தப் புரோட்டான்கள் 6·2 *BeV* ஆற்றல் அடைந்துவிடும். 30·48 மீட்டர் விட்டமுடைய தடத்தில் சுழலும் எலெக்ட்ரான்கள் 1·8 விஞடியில் 4 மில்லியன் சுற்றுகள் முடித்துவிடும்.

அர்கான்னேயில் உள்ள, புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரான் (புலஎண் $n=0$) 12·5 *BeV* ஆற்றல்தர வல்லதாகும். இப்பொறியின் சுற்றளவு 171·602 மீட்டர் ஆகும். ஒவ்வொன்றும், 17·0688 மீட்டர் நீளமுள்ள, 8 வில் வடிவக் காந்தப் பகுதிகள் இப் பொறியில் உள்ளன. இதில், அடுத்தடுத்துள்ள நேர்ப்பகுதிகள் 4·2672 மீட்டர் நீளமும், 6·0960 மீட்டர் நீளமும் உடையன. வெற்றிட அறையின் குறுக்குவெட்டுத் தோற்றம், 0·8128மீ.×0·1331மீ. ஆகும்.

பிரின்ஸ்டன் பல்கலைக் கழகத்திலுள்ள சிங்க்ரோட்ரான் 3 *BeV* ஆற்றலுடைய செறிவுமிக்க துகள் கற்றையைத் தரவல்லது. கலிபோர்னியாப் பல்கலைக் கழகத்திலுள்ள எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான் மாக்மில்லன் என்பாரால் உருவாக்கப்பட்டது. இப்பொறி 340 *MeV* ஆற்றல் தரவல்லதாகும். ரோமில் உள்ள மென்குவிப்புச் சிங்க்ரோட்ரான், வாண்டிகிராஃப் இயற்றியிலிருந்து 3 *MeV* ஆற்றலோடு வெளிவரும் எலெக்ட்ரான் கற்றையை 1·2 *BeV* ஆற்றல் உடையதாக மாற்றவல்லது.

8.10. முடிவுரை

BeV எல்லைவரையும், அதற்கு மேலும், துகள்களின் ஆற்றலைப் பெருக்க முடியும் என்பதற்குச் சான்ருக விளங்குவது இந்தச் சிங்க்ரோட்ரான். பந்தயப்பாதை அமைப்புடைய இப் பொறியில் அமைந்துள்ள நேர்ப் பகுதிகளினல் பெரும்பாலான காந்தப் பகுதிகளுக்காகும் செலவு குறைகின்றது. மென்குவிப்புப் பொறிகள் யாவற்றிலும் ஆற்றல்தர வல்லதாக உள்ள ஏற்றமிகு பொறிகள் சிங்க்ரோட்ரான் ஆகும்.

இப் பொறிகளில் ஏற்றமிகு ஆற்றல்களை அடைய, அலைவானின் அதிர்வெண் உரிய முறையில் மாற்றப்பட வேண்டும் என்பது தெளிவாக்கப்பட்டது. பின்னர், துகளின் தடநிலைப்பாடு குறித்து ஆராய்ந்த

அட்டவணை 8.3
சிங்க்ரோட்ரானின் இயல்புகள்

அளபுரு	அலகு	புருக் ஹேவன் 1952	பர்மிங் காம் 1953	பெர்க்கிலி 1954	ட்யூப்னு 1957	சாக்ளே 1958	பிரின்ஸ் டன் 1964	ஹார்வெல் 1964	அர்கான்னே 1964
பெரும ஆற்றல்	BeV	3	3	6·2	10	3	3	7	12·5
தட ஆரம்	மீட்டர்	9·14	4·50	15·24	28	11	12·2	23·6	27·4
நேர்ப்பகுதிகளின் எண்ணிக்கை	—	4	0	4	4	4	16	8	8
இரும்பின் எடை	டன்கள்	1,650	800	9,700	36,000	1,080	350	7,000	4,000
கற்றைத் துடிப்புகள் / நிமிடம்	—	12	6	10	5	19	1,140	28	15
பெருமப் புலம்	வெபர்/மீட்டர்2	1·38	1·26	1 54	1·3	1·5	1·38	1·4	2·15
உட்செலுத்தப்படும் துகள் ஆற்றல்	MeV	3·6	0·46	9·9	9	3·6	3	15	50
முடுக்கந்தரும் பகுதிகள்	—	1	1	1	2	1	4	1	2
வெற்றிட அறை அகலம்	மீட்டர்	0·91	0·50	1·22	1·50	0·60	0·18	0 91	0·81
வெற்றிட அறை உயரம்	மீட்டர்	0·21	0·21	0·30	0·40	0·10	0 07	0·24	0·15

போது, ஆயத்திசை ஆரத்திசை ஆகிய இரு திசைகளிலும் தோன்றும் கலைக்கோண மாறுபாட்டின் கொஸைன் மதிப்பு (*Cosine Value*) 1+க்கும் −1 க்கும் இடையே நிலவவேண்டும் என்று முடிவு செய்யப் பட்டது. மேலும், பீட்டாட்ரான் அலைவுகளிடையே ஒத்திசைவு தோன்றுதிருக்க, புலஎண் மதிப்பு $0{\cdot}5<n<0{\cdot}8$ என்ற வரம்புக்குள் அடங்கவேண்டும் என்பதும் பெறப்பட்டது.

பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் வீச்சிஞல் வெற்றிட அறை அளவுகள் நிர்ணயிக்கப்படுகின்றன எனவும், செவ்வக வடிவ அறையே உகந்தது எனவும் கூறப்பட்டது. உட்செலுத்தப்பட்ட துகள்கற்றை உரிய ஆற்றல் பெற்றபின், இலக்கின்மேல் மோதச் செய்து மெசான், ஹைபெரான் முதலிய துகள்களைப் பெறுவது குறித்தும் கண்டோம்.

எலெக்ட்ரான்கள் மிக விரைவிலேயே ஒளிவேகத்தை நெருங்க வல்லன ஆதலால், எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரானில் அலைவானின் அதிர்வெண் மாறிலியாகவும், காந்தப்புலம் அதிகரிக்கக் கூடியதாகவும் அமையும் என்று தெளிவு செய்யப்பட்டது. எலெக்ட்ரான்கள் வட்டத் தடத்தில் இயங்கும் போது ஆற்றலை இழக்க வாய்ப்புண்டு, ஆதலால் அதை விலக்கும் முறையும் கூறப்பட்டது.

இவ்விதமாகப் பலவகையிலும் சீரமைக்கப்பட்ட இப் பொறியிலும், சில குறைபாடுகளும் இடர்ப்பாடுகளும் எழுந்தமையால், வேறு வழிவகைகளைப் பற்றிய ஆய்வுகள் தொடர்ந்தன. அதன் காரணமாக வடிவமைக்கப்பட்ட புதுப்பொறிகள் பற்றி அடுத்த அத்தியாயத்தில் காணலாம்.

9. அரும் பொறிகள்

9.1. முன்னுரை

சிங்க்ரோட்ரான் எனப்படும் முடுக்கிகள், பல ஆய்வரங்குகளில் அமைக்கப்பெற்றுப் பயன்பட்டு வந்தன என்பதைக் கண்டோம். இந்தப் பொறிகள் மூலம் பெறக்கூடிய பெருமஆற்றல் 10 BeV ஆகும். சிங்க்ரோட்ரானை உருவாக்குவதில் வெற்றியடைந்த அறிவிய லாளர்கள், மேலும் ஆற்றல்மிகுந்த பொறிகளை உருவாக்க எண்ணினர். இத்தகு முயற்சிகள் காரணமாகப் புதியதொரு பொறி உருவாயிற்று.

சிங்க்ரோட்ரானைப் பயன்படுத்தியே பெருமஆற்றல் பெறுவதில் பல இடையூறுகள் உண்டு. அவற்றுள் முக்கியமானது அமைப்புக் காகும் செலவாகும். ஆற்றலை, மிகுதியாக்க வேண்டுமெனில், காந்தத்தின் அளவை அதிகரிக்க வேண்டும். எனவே, இதற்காகும் செலவும் அதிகமாகும். இந்தக் காரணத்தால் ஆற்றலைப் பெருக்க வேறு வழியைக் காணவேண்டிய சூழ்நிலை ஏற்பட்டது. பொறியில் தோன்றிய சில இடையூறுகளை விலக்க முற்பட்ட *CERN*-ஐச் சேர்ந்த விஞ்ஞானிகள் சிங்க்ரோட்ரானை நான்கு பகுதிகளாகப் பிரிக்காமல், பதினாறு பகுதிகளாகப் பிரிப்பது நன்மை பயக்கும் என எடுத்துரைத்தனர்.

இதே நேரத்தில் M.S. லிவிங்ஸ்டன் காந்தத் தெவிட்டு நிலையால் *(Magnetic Saturation)* தோன்றும் உருப்பிறழ்ச்சி விளைவுகளை *(Distortion Effects)*, எவ்வாறு தவிர்க்கலாம் என்ற பிரச்சினைக்கு, நல்லதொரு தீர்வைக் கண்டார். அடுத்தடுத்துள்ள காந்தப் பகுதிகள், ஒன்றுக்கொன்று எதிர்விளைவுகளை உருவாக்கும் வண்ணம் அமைக் கப்படுவதன் மூலம் உருப்பிறழ்ச்சி விளைவுகளைச் சராசரியாக விலக்கலாம் என்று தெளிவு செய்தார்.

அடுத்தடுத்துள்ள காந்தப் பகுதிகளை இவ்விதம் அமைப்பதன் மூலம் காந்தத்தின் வாட்டமானது இருவேறு மதிப்புகளைப் பெறும். ஆகவே, காந்தம் தெவிட்டு நிலையை அடையும்போது புலஎண்ணின் (n) மதிப்பு ஒரு பகுதியில் ஒன்றை (1) விட மிகுந்திருக்கும். அடுத்த பகுதியில் அதன் மதிப்பு எதிர்க்குறி பெற்றிருக்கும். ஆகவே, சராசரியாக நோக்கும் போது சுழியத்திற்கும் ஒன்றிற்கும் இடையில் பொருத்தமான முடிவுகள் தோன்றும். இதுவே, லிவிங்ஸ்டன் கூறிய கருத்தாகும்.

இந்தக் கருத்தை ஆராய்ந்த அறிவியலாளர்கள், மிகச் சிறந்ததும் புதுமையானதுமான முறையொன்றைக் கண்டு பிடித்தனர். இவ்வாறு உருவான புதுமையான கருத்து 'வன்குவிப்பு' (*Strong Focussing*) எனப்படும்.

இக்கருத்தைப் பற்றி விரிவாகக் காணும் முன்பாக இதுபற்றிய வரலாற்றினைச் சிறிதே காணலாம். 1938-ம் ஆண்டிலேயே தாமஸ் (*Thomas*) என்பார், இந்த வன்குவிப்பு முறையின் சிறப்பினைக் கூறியிருந்தார். ஆயினும், இது அறிவியலாளர்களின் கவனத்துக்கு வரவில்லை. இதே கருத்தினை 1947-ம் ஆண்டில் கிரிஸ்டோஃபைலஸ் (*Christofilos*) என்ற கிரேக்க நாட்டுப் பொறியியலாளரும் தமது ஆய்வின்மூலம் வெளியிட்டிருந்தார். இவரது கட்டுரையும் அணுவிய லாளர்களுக்குத் தெரியாமலே இருந்தது.

ஆனால், 1952-ம் ஆண்டில் குராண்ட் (*Courant*), லிவிங்ஸ்டன், ஸ்னைடர் (*Snyder*) ஆகியோரின் கூட்டு முயற்சியால் வன்குவிப்பு என்னும் இதே தத்துவம் தெளிவாக்கப் பெற்றது. லிவிங்ஸ்டனின் கருத்தை, ஆராய்ந்த குராண்ட் அடுத்தடுத்த காந்தப் பகுதியில் வாட்டங்கள் மாறிமாறி இருப்பதால் வன்குவிப்பை உருவாக்கலாம் என்று கண்டுபிடித்தார். அதற்கான கோட்பாட்டியல்களைக் குராண்ட்டும் ஸ்னைடரும் சேர்ந்து நிறுவினர். இவ்வாறாக, இந்தச் சிறந்த கருத்து செயல்முறைப்படப் பல ஆண்டுகள் ஆயின. அறிவியல் வரலாற்றில் இத்தகு நிகழ்ச்சிகள் புதுமையல்ல. இந்த வன்குவிப்புத் தத்துவம் செயல்படுத்தப்பட்ட சிங்க்ரோட்ரான்கள் மென்குவிப்புச் சிங்க்ரோட்ரான்களைக் காட்டிலும் ஆற்றல் மிகுந்தவையாக விளங்கின. ஆற்றல்ஈட்டம் மிகுந்த சிறந்த பொறிகளை அமைப்பதில் வன்குவிப்பு என்னும் இந்த அரிய தத்துவம் பெரிதும் பங்கேற்றது. எனவே, இத் தத்துவம் செயல்பட்டுப் பேராற்றல்தரும் பொறிகளை 'அரும்பொறிகள்' என்பதில் பிழையில்லை யன்றோ!

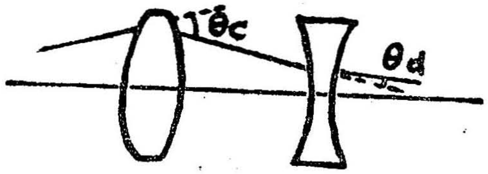
9.2. மென்குவிப்பும் வன்குவிப்பும்

வன் குவிப்பு முறையைக் காணும் முன்பாக, காந்தக் குவிப்பு (*Magnetic Focussing*) என்றால் என்னவென்று காண்போம். தட இயக்கத்தில் புலமானது ஆரத்திசையில் (*Radial Direction*) குறையுமானால், ஆயத்திசையில் நிலைப்பாடு தோன்றும். ஆனால், ஆரத்திசையில் நிலைப்பாடு இருக்காது. மாறாக, காந்தப் புலமானது ஆரத்திசையில் அதிகரித்தால் ஆயத்திசையில் நிலைப்பாடு இருக்காது. ஆனால், ஆரத்திசையில் நிலைப்பாடு தோன்றும். அதாவது, புலஎண் குறிப்பிட்டதொரு மதிப்பைப் பெறும்போது ஆயத்திசையில் நிலைப்பாடும், ஆரத்திசையில் நிலைப்பாடற்ற தன்மையும் உருவாகும். ஆனால், புல எண்ணின் வேறொரு மதிப்பிற்கு ஆரத்திசையில் நிலைப்பாடும் ஆயத்திசையில் நிலைப்பாடற்ற தன்மையும் தோன்றும். இந்தக் காரணங்களால், மாறாவாட்டமுடைய (*Constant Gradient*) பொறிகளில் புலஎண்ணின் மதிப்பு 0-க்கும் + 1-க்கும் இடையில் இருந்தால்தான் நிலைப்பாட்டை உருவாக்கலாம் எனக் கண்டோம்.

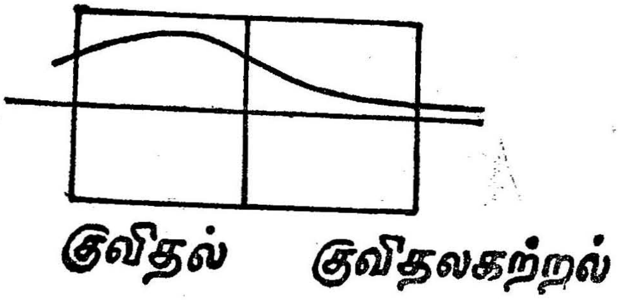
இந்த விதிக்கு உட்பட்டு இயங்குகின்ற மாறுநிலை எல்லையிலும் (*Critical Region*) குவிக்கின்ற விசைகள் வலுவானதாக இல்லை. எனவே, இப் பொறிகளில் செயல்பாட்டு அளவிற்கு வீச்சுடைய பீட்டாட்ரான் அலைவுகளைக் கட்டுப்படுத்த முடியாது. இதனால், பெரும வீச்சுடன் கூடிய பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கு உட்படும் துகள்கள் வெற்றிட அறையின் சுவரில் மோதி இழந்துபோகலாம். ஆகவே, வெற்றிட அறையின் குறுக்குவெட்டுப் பரப்பை அதிகமாக்க வேண்டியுள்ளது. இதனால், பொறிக்காகும் செலவும் அதிகமாகின்றது. ஆகவே, மென்குவிப்புப் பொறிகளில் மாறாவாட்டமுடைய புலத்தால் தோன்றும் இடையூறுகளை உருவாக்கப் புதியதான வன்குவிப்பு என்னும் உத்தியைக் கையாள வேண்டியுள்ளது.

இதுகாறும் நாம் கண்ட பொறிகளில் ஒரே வகையான வாட்டமுடைய காந்தங்களே இடம் பெற்றன. ஆனால், இந்தப் புதிய முறையில் இருவேறு வகையான வாட்டங்கள் பெற்றுள்ள காந்தங்கள் பயன்படுத்தப்பட்டன. ஒரு காந்தம், குறிப்பிட்ட அளவு கிடைமட்ட நீளத்திற்குப் பெரும் ஆரத்திசை வாட்டம் உடையதாக இருக்கும். அதாவது இந்தக் காந்தத்தின் புலஎண், ஒன்றைவிடப் பெரிதாக ($n>1$) இருக்கும். ஆகவே வலுமிக்க விசைகள் தோன்றி ஆயத்திசையில் குவிதலும் ஆரத்திசையில் குவிதலகற்றலும் (*Defocussing*) நிகழும். அடுத்துள்ள காந்தப்பகுதி இதற்கு நேர்மாறான வாட்டம் ($n<1$) பெற்று இருக்கும். ஆகவே, ஆரத்திசையில் குவிதலும் ஆயத்திசையில் குவிதலகற்றலும் தோன்றும். எனவே, இரண்டு காந்தங்களும் இணைந்து செயல்படும் போது குவிக்கின்ற விசைகளின்

(Focussing Forces) வலிமை மிகும். இந்தக் காரணத்தால், தடமானது ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும் நிலைப்பாடு உடைய தாக அமையும். இந்தக் கருத்தைத் தெளிவாகப் புரிந்து கொள்ள ஓர் ஒப்புமையைக் காணலாம்.



படம் 9.1 குவி-குழிவில்லைத் தொகுப்பு



படம் 9.2 குவிதல் குவிதலகற்றல்

படம் 9.1 -ல் காட்டியுள்ளவாறு அமைந்த வில்லைத்தொகுப்பு ஒன்றைக் கருதுவோம். வில்லைகளின் குவியத்தூரங்கள் f_1, f_2 எனவும், அவற்றிற்கு இடையிலுள்ள தூரம் d எனவும், வில்லைத் தொகுப்பின் குவியத்தூரம் F எனவும் கொண்டால்

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

என அறிவோம். $f_2 = -f_1$ எனில், $F = f_1^2/d$ ஆகவே தொகுப்பின் குவியத்தூரம் எப்பொழுதும் நேர்க்குறி பெற்றிருக்கும். இந்தக் காரணத்தால், இத் தொகுப்பானது கதிர்களை வலுவாகக் குவிக்கும். இத் தத்துவமே வன்குவிப்புப் பொறிகளிலும் பயன்படுகின்றது.

புலஎண் ஒன்றுக்கு மேற்பட்ட மதிப்பைப் பெற்றுள்ள காந்தப் பகுதியானது ஆயத்திசையில் குவிவில்லையைப் போலவும், ஆரத் திசையில் குழிவில்லையைப் போலவும் செயல்படும். மாறாக +1-ஐ விடக் குறைந்த புலஎண் மதிப்புடைய காந்தப் பகுதி ஆயத்

திசையில் குழிவில்லையைப் போலவும், ஆரத்திசையில் குவிவில்லையைப் போலவும் செயல்படும். இத்தகு காந்தப் பகுதிகள் தொடர்ச்சியாக அமைக்கப்படுமானால், ஆயத்திசையிலும் ஆரத்திசையிலும், தேவையான நிலைப்பாடு உருவாகும். இந்த உத்தியே வன்குவிப்பு (*Strong Focussing*), அல்லது இருவாட்டக் குவிப்பு (*Alternating Gradient Focussing*) எனப்படும். இந்தக் குவிப்பால் தோன்றும் மீட்பு விசையால் (*Restoring Force*) வீச்சு மிகுந்த பீட்டாட்ரான் அலைவுகளைக் கட்டுப்படுத்தலாம். இந்த உத்தியை அடிப்படையாகக் கொண்ட சிங்க்ரோட்ரான் இரு வாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான் (*Alternating Gradient Synchrotron*) எனப்படும்.

பொறியினுள் இயங்கும் துகள்கற்றையானது தன் ஆற்றல் வளர்ச்சிக்கு இடையூறு செய்யும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கும் சிங்க்ரோட்ரான் அலைவுகளுக்கும் ஈடுகொடுத்து, இரு இடையூறுகளாலும் பாதிக்கப்படாமல் ஆற்றல் வளம் பெருக்கிக் கொள்ள வேண்டும். ஆகவே,பொறியின் அமைப்பு இவ்விரண்டு தேவைகளையும் நிறைவு செய்யுமாறு அமைய வேண்டும்.

இந்த அரும்பொறிகள் உருவான வரலாற்றை இதுவரை கண்டோம். இனி, இந்தப் பகுதியில் அதன் செயல்முறையையும் அதன் வழியாக வளர்ந்த சில முதன்மையான கொள்கைகளையும் காண்போம்.

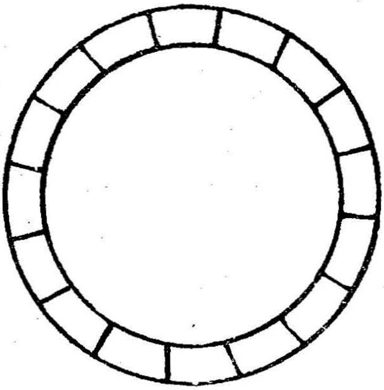
முதலாவதாக, அரும்பொறிகள் உருவாகக் காரணமான வன்குவிப்பு தத்துவத்தை, மென்குவிப்புத் தத்துவத்துடன் ஒப்பிட்டு விளக்கம் தரப்படும். பின்னர், வன்குவிப்பை உருவாக்கவல்ல நால்துருவ வில்லை அமைப்பு மேட்ரிக்ஸ் முறை எனப்படும் கணித முறை கொண்டு விளக்கப்படும்.

வன்குவிப்புப் பொறிகளிலும் தடநிலைப்பாடுபெறத் துகளானது பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கு உட்படும். எனவே, அந்த அலைவுகளைக் குறித்தும் ஆராயவேண்டியுள்ளது. மேட்ரிக்ஸ் கணிதவியல் முறையால் அவ்வலைவுகளை ஆராய்ந்து நிலைப்பாட்டிற்கான விதிகள் பெறப்படும்.

இரண்டாம் அத்தியாயத்தில் கண்ட உந்த இறுக்கம் என்னும் கருத்து, இந்த வன்குவிப்புப் பொறியில், கலைக்கோண நிலைப்பாட்டை ஆராய உதவுமாதலால் அதுபற்றியும் பேசப்படும்.

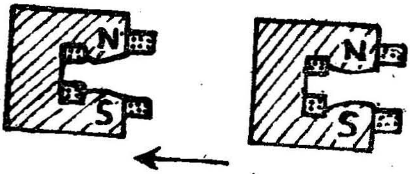
இறுதியாக, இந்த வன்குவிப்பு தத்துவத்தினால் அமைக்கப்பட்ட நால்துருவ வில்லைகள் முடுக்கும் பொறிகளின் அமைப்பில் எவ்வாறெல்லாம் பயன்படுகின்றன என்றும் காண்போம்.

9. 3 அமைப்பும் இயக்கமும்



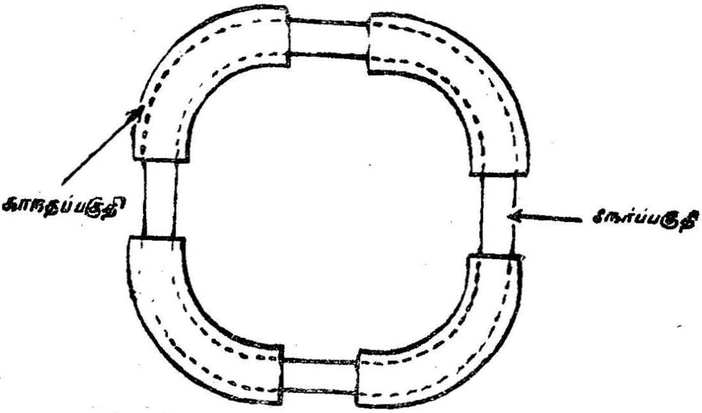
படம் 9.3 இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான் அமைப்பு

இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரானில் காந்தங்களின் அமைப்பைப் படம் 9.4 ல் காணலாம். அடுத்தடுத்துள்ள காந்தப் பகுதிகளில் ஒன்றின் புலஎண் மதிப்பு $n>1$ எனில், அடுத்த பகுதியின் புலஎண் மதிப்பு $n<1$ ஆக இருக்கும்.



படம் 9.4 தொடர்ந்துள்ள காந்தங்களின் குறுக்குவெட்டுத் தோற்றம்

இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான்களை அமைக்கும் போது, வேறுபட்ட வாட்டமுடைய அடுத்தடுத்த காந்தப் பகுதிகளுக்கிடையே நேர்ப்பகுதிகளையும் அமைப்பது (படம்-9.5) மரபு. இத்தகு சிங்க்ரோட்ரான் பொறியானது, பந்தயப் பாதை சிங்க்ரோட்ரான் (*Race-Track Synchrotron*) எனப்படும். நேர்ப்பகுதிகளுக்குள்ளே காந்தப்புலம் சுழியமாகும். அத்தகு நேர்ப்பகுதிகளில் ரேடியோ அதிர்வெண் அமைப்புகளையும் பிறவற்றையும் அமைக்கலாம்.

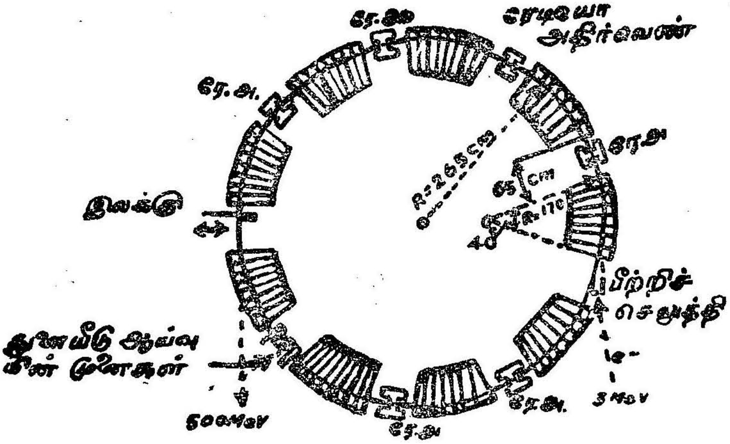


படம் 9.5 பந்தயப் பாதை A.G சிங்க்ரோட்ரான்

ஒரு காந்தப் பகுதியிலிருந்து மற்றொரு காந்தப் பகுதியினுள் நுழையும் முன்பாகத் துகள் நேர்ப்பகுதியினுள் செல்லவேண்டியுள்ளது. நேர்ப்பகுதியினுள் வழிப்படுத்தும் காந்தப்புலம் இல்லையாதலால், நேர்ப்பகுதி மிகுந்த நீளமுடையதாக இருக்கக் கூடாது. நேர்ப்பகுதியின் நீளம் மிகப் பெரிதாக இருக்குமானால், ஒரு காந்தப் பகுதியிலிருந்து வெளிவரும் துகள்கள் அடுத்துள்ள காந்தப் பகுதியை அடையாமல் தவறிப்போகும் வாய்ப்புண்டு.

வன்குவிப்புச் சிங்க்ரோட்ரான்களில் துகளின் குறிப்பிட்டதொரு தடம் விலகிப்போக வாய்ப்பில்லை. தவிரவும், வன்குவிப்பின் காரணமாக வீச்சு மிகுந்த பீட்டாட்ரான் அலைவுகளும் ஒடுக்கப்படுகின்றன. இதனால், மென்குவிப்புச் சிங்க்ரோட்ரானின் வெற்றிட அறையில் பத்திலொரு மடங்குள்ள வெற்றிட அறை இப்பொறியில் இருந்தாலே துகள் இயங்கப் போதுமானதாகும்.

வன்குவிப்புத் தத்துவத்தைப் பயன்படுத்தி 20 *BeV* ஆற்றலுக்குப் புரோட்டானை முடுக்கும் பொறிகளில் உள்ள காந்தப் பகுதியின் அளவு மிகச் சிறியதாகும். 6 *BeV* புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரானின் காந்தப்பகுதியின் பாதிக்கும் குறைந்த அளவுடைய காந்தப் பகுதி தான் 20 *BeV* இருவாட்டந்தரு புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரானில் உள்ளது.



படம் 9.6 வன்குவிப்பு எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான்

காட்டாக, வன்குவிப்புத் தத்துவம் பயன்படும் எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான் ஒன்றின் அமைப்பைக் காண்போம்.

பான் (*Bonn*) எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரானில் வன்குவிப்புத் தத்துவம் பயன்படுத்தப் படுகின்றது. இந்தப் பொறியில் 9 காந்தப்

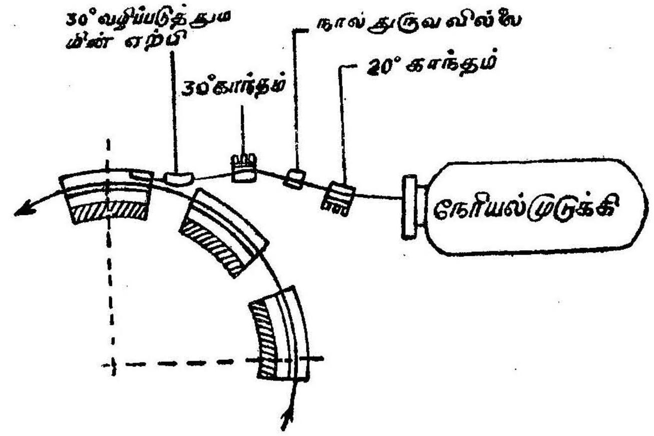
பகுதிகளும், 9 நேர்ப்பகுதிகளும் உள்ளன. தடம், பல வளைவுப் பகுதிகளாகப் பிரிக்கப்பட்டு இடையிடையே நேர்ப்பகுதிகள் இணைக்கப்பட்டுள்ளன. ரேடியோ அதிர்வெண் முடுக்கந்தரும் அமைப்பு, இலக்கு முதலியவற்றைக் காந்தப்புலத்தின் ஆதிக்கத்தில் வைக்கமுடியாது. ஆதலால், நேர்ப்பகுதியில் முடுக்கந்தரும் அமைப்பு, இலக்கு முதலியவற்றைப் பொருத்தலாம். வழிப்படுத்தும் காந்தப்புலத்தின் இயல்பு சிறக்கவேண்டுமெனில் இவ்வமைப்பே உகந்ததாகும். இப்பொறியில் உள்ள ஒன்பது வளைந்த காந்தப் பகுதிகள் ஒவ்வொன்றும் வளைவு மையத்தில் 40° கோணத்தை அமைக்கின்றன. நேர்ப்பகுதிகள் ஒவ்வொன்றும் 0·65 மீட்டர் நீளமுடையது. வாண்டிகிராஃப் இயற்றியிலிருந்து 3 *MeV* ஆற்றல் பெற்றுவரும் எலெக்ட்ரான்கள் இப்பொறியினுள் செலுத்தப்படுகின்றன. இப் பொறியில் புலஎண் மதிப்பு 17 ஆகும். இதனல் தோன்றும் பெருமப் புலவாட்டம் 1000 காஸ்/செ.மீ. ஆகும். உந்த இறுக்கம் $a = \frac{1}{6}$ ஆகும்.

வட்டவில் வடிவமுடைய ஒன்பது காந்தங்களும் ஒரேமாதிரி அமைப்புடையன. இக் காந்தங்கள் 5 மீட்டர் விட்டமுள்ள வட்டத்தில் பொருத்தப்பட்டுள்ளன. துருவ முனைகளின் பக்கவாட்டுத் தோற்றம் அதிபரவளைய (*Hyperbola*) வடிவம் உடையது என்பதைக் காணலாம். வெற்றிட அறையையும் கிளர்சுருள்களையும் வைப்பதற்கேற்ப இணைப்புச் சட்டம் காந்தத்தின் மத்தியில் உள்ளது. இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரானில் காந்தத்தின் தரமானது அதன் உருவமைப்பை மட்டும் சார்ந்திராமல், அதன் புல உருப்பிறழ்ச்சியை (*Field Distortion*) விலக்கும் திறனையும் சார்ந்துள்ளது. இப் பொறியில் எலெக்ட்ரான்கள் ஆறு ரேடியோ அதிர்வெண் ஒத்ததிர்விகளால் (*Resonators*) முடுக்கம் பெறுகின்றன. 15 *kV* மின்னழுத்தத்தில் செயல்படும் பொதுவான அலைவான் ஒன்று, ஆறு ஒத்ததிர்விகளையும் இயக்குகின்றது.

வன்குவிப்புப் பொறிகளில் வெற்றிட அறையின் உயரம் மிகச் சிறியதாகும். எனவே, துகளை உட்செலுத்தும்போது மிகக்கவனமாக இருக்கவேண்டும். படம் 9.7-ல் அமைந்துள்ளவாறு 0·64 மீட்டர் வளைவு ஆரமும், 30° விலக்கந்தர வல்லதுமான உருளைவடிவ மின்னேற்பி ஒன்று, நடுநிலைத் தடத்திற்கு 2×10^{-2} மீட்டர் தூரத்தில் வைக்கப்பட்டுள்ளது. இந்த மின்னேற்பியானது எலெக்ட்ரான்களை வெற்றிட அறையுள் தொடுவியலாகச் (*Tangentially*) செலுத்துகின்றது.

1959-ல் *CERN*-ல் உருவாக்கப்பட்ட புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரானிலும் வன்குவிப்புத் தத்துவம் பயன்படுத்தப்பட்டது. இதன் வெளியிடுஆற்றல் 29 *BeV* ஆகும். புரூக்ஹேவன் ஆய்வகத்தில்

உருவாக்கப்பட்ட மற்றொரு பொறி 1960-ல் இயங்கத் தொடங்கியது. இந்தப் பொறியின் விட்டம் 256·03 மீட்டர் ஆகும். இப் பொறியில் 240 வன்குவிப்புக் காந்தப்பகுதிகள் உள்ளன. இக் காந்தப்பகுதிகள் நேர்ப்பகுதிகளால் பிரிக்கப்பட்டிக்கும். வளைய வடிவ வெற்றிட அறையின் குறுக்குவெட்டு 0·15 மீட்டர் நீளமும், 0·07 மீட்டர்



படம் 9.7 துகளை உட்செலுத்தல்

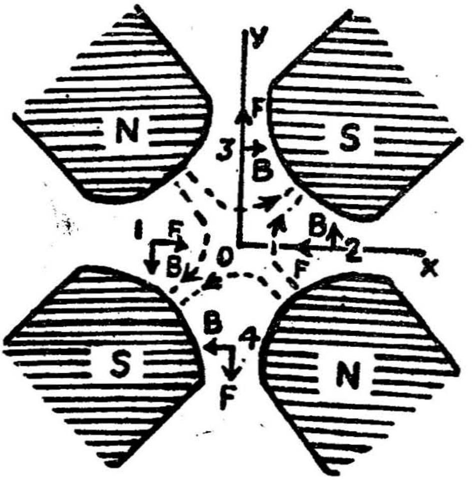
அகலமும் கொண்ட செவ்வகப் பரப்பாகும். வன்குவிப்பு செயல் படுகின்ற காரணத்தால், இந்தச் சிறு அறையினுள்ளும் துகள் வட்டமிட முடிகின்றது. இப் பொறியில் இயங்கும் புரோட்டான்கள் 1 விநாடியில் 2,60,000 முறை சுற்றிவருகின்றன. பெரும ஆற்றலை அடையும் முன் அவை செல்லும் தூரம் ஏறத்தாழ 2,08,000 கி.மீ ஆகும்.

9.4. நால்துருவ வில்லைகள் (Quadrupole Lenses)

வன்குவிப்புத் தத்துவத்தால் நேரியல் முடுக்கியிலும் சில மாறுதல்கள் தோன்றின. நேரியல் முடுக்கியில் கலைக்கோண நிலைப் பாட்டை உருவாக்க நகர்வுகுழாய்கள் மூலம் 'நிலைமின்னியல் குவிதல் அகற்றல்' (*Electrostatic Defocussing*) முறை பயன்படுத்தப்பட்டது. விசைக் கோடுகளைத் திருத்த உலோகக் கிரிடுகள் (*Metal Grids*) பயன்படுத்தப் பட்டன என்றும் கண்டோம். ஆனால், கற்றையில் ஒருபகுதி கிரிடில் மோதி இழப்பதைத் தவிர்க்க முடியவில்லை என்றும் கூறப்பட்டது. இச் சிக்கலை விலக்க இருவாட்டந்தரு வில்லைகள் (*Alternating Gradient Lenses*) உதவின. இவ்வமைப்பு நான்கு

காந்தத் துருவங்களைக் கொண்டுள்ளதால், இது நால்துருவ வில்லை எனவும் அழைக்கப் பெறும்.

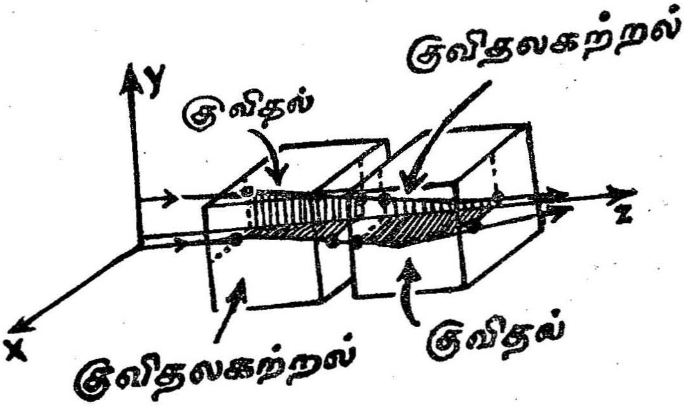
நால்துருவ வில்லையின் அமைப்பைப் படம் 9.8 -ல் காணலாம். நான்கு துருவங்களும் சேர்ந்து மையத்தில் உருவாக்கும் காந்தப்புலம் சுழியமாகும். பிற இடங்களில் படத்தில் காட்டியுள்ளவாறு விசைக் கோடுகள் அமைந்துள்ளன. இத் துருவங்கள் விளைவிக்கும் காந்தப் புலத்தில் நேர்மின்னூட்டமுடைய துகள்கள் தாளின் தளத்திலிருந்து



படம் 9.8 நால்துருவ வில்லையும் புல அமைப்பும்

நம்மை நோக்கி வருவதாகக் கற்பனை செய்து கொள்ளுவோம். *O* எனும் மையத்தின் வழியாகச் செல்லும் துகள்களின் இயக்கம் பாதிக்கப்படுவதில்லை. ஆனால், 1, 2 என்று குறிக்கப்பட்டுள்ள புள்ளிகளின் வழியே செல்லும் துகள்கள் மையத்தை நோக்கிய விசையால் பாதிக்கப்படும். 3, 4 எனக் குறிக்கப்பட்டுள்ள புள்ளி களின் வழியே வெளிவரும் துகள்கள் மையத்தை விட்டு விலகும் விசையால் பாதிக்கப்படும். ஆகவே, 1, 2 என்ற இரு புள்ளிகளின் வழியே வெளிவரும் துகள்கள் 'குவிதல் விளைவிற்கும்' *(Focussing Effect)* 3, 4 என்ற இருபுள்ளிகளின் வழியே வெளிவரும் துகள்கள் குவிதலகற்றும் விளைவிற்கும் *(Defocussing Effect)* உட்படும் என்று கூறலாம். எனவே, முன்னர் கண்ட குவிவில்லை குழிவில்லைத் தொகுப்போடு இந்த அமைப்பை ஒப்பிட்டால், காந்த நால்துருவ வில்லையானது கிடைத்தளத்தில் குவிப்பதாகவும், செங்குத்துத் தளத்தில் குவிதலகற்றுவதாகவும் அமைகின்றது என்பது தெளிவாகும்

இந்தக் காந்த வில்லையை அடுத்து, அதே இயல்புடைய மற்ளுெரு வில்லையை 90° சுழற்றிவைத்தால் அது செங்குத்துத் தளத்தில் குவிப்பதாகவும், கிடைத்தளத்தில் குவிதலகற்றுவதாகவும் செயல்படும். எனவே, இத் தன்மையுடைய நால்துருவ வில்லைகளை அடுத்தடுத்து வைப்போமாளுல், இரண்டு தளங்களிலும் குவி குழி வில்லைகள் வரிசையாக வைக்கப்பட்டுள்ளதுபோல் அமையும். இத்தகு அமைப்பால் உருவாகும் துகளின் பாதைகள் படம் 9.9 -ல் காட்டப்



படம் 9.9 நால்துருவ வில்லையில் துகளின் பாதை

பட்டுள்ளன. இதைப் போன்ற அமைப்புகளால் உருவாகும் இறுதி விளைவு வன்குவிப்பாகும். இதளுல், இத்தகு நால்துருவ வில்லைகளை நேரியல் பொறியில் நகர்வு குழாயினுள் அமைத்தால் குவிக்கும் விளைவு வலுவாக அமையும்.

9.5. வன்குவிப்புப் பொறிகளில் பீட்டாட்ரான் அலைவுகள்

வன்குவிப்புப் பொறிகளில் இயங்கும் துகள்கள், பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கும், சிங்க்ரோட்ரான் அலைவுகளுக்கும் உட்படும். எனவே, இவ்விரு அலைவுகளினுலும் நிலைப்பாடு சிதையாமல் பார்த்துக் கொள்ளவேண்டும். முதலில், பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் இயல்பையும், தடநிலைப்பாடு நிலவத் தேவையான விதிகளையும் காண்போம்.

படம் 9.9-ல் உள்ளவாறு 'v' திசை வேகமுடன், z-அச்சின் வழியே இயங்கும் துகளொன்றைக் கருதுவோம். துகளின் நிறை M எனவும்

மின்னூட்டம் q எனவும் குறிப்போம். (x, y) என்ற புள்ளியில் காந்தப்புலக் கூறுகள் $B_x = ky$ (9.1)

$$B_y = kx \tag{9.2}$$

என்று எழுதலாம்; k என்பது புல வாட்டத்தைக் குறிக்கின்ற மாறிலியாகும். துகள் ஒன்று அப் புள்ளியை அடையுமாயின் அதன் மீது செயல்படும் விசை F -ன் x, y திசைக் கூறுகள் முறையே

$$F_x = -q\,v\,B_y \tag{9.3}$$

$$F_y = q\,v\,B_x \tag{9.4}$$

அல்லது,

$$M\frac{d^2x}{dt^2} = -q\,v\,B_y \tag{9.5}$$

$$M\frac{d^2y}{dt^2} = q\,v\,B_x \tag{9.6}$$

என்று ஆகும்.

அல்லது,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{qv}{M}B_y \tag{9-7}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{qv}{M}B_x \tag{9.8}$$

துகளானது, z அச்சின் வழியே இயங்குவதால் $dz = vdt$ ஆகும்.

∴ சமன்பாடுகள் 9.1, 9.2 -ஐச் சமன்பாடுகள் 9.8, 9.7 -ல் பதிலீடு செய்தால்,

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \left(\frac{qk}{Mv}\right)x = 0 \tag{9.9}$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} - \left(\frac{qk}{Mv}\right)y = 0 \tag{9.10}$$

என்று பெறலாம். $qk/Mv = \omega^2$ என்று குறிப்போமானால்,

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \omega^2x = 0 \tag{9.11}$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} - \omega^2y = 0 \tag{9.12}$$

நாம் கருதுகின்ற நால்துருவ வில்லை, x-ஆயத்திசையில் குவித்தலையும், y -ஆயத்திசையில் குவிதலகற்றலையும் உருவாக்கவல்லது. எனவே, k ஆனது நேர்க்குறி பெற்றிருக்கும். இவ்வாறு இல்லாமல், நால்துருவ வில்லை y -ஆயத்திசையில் குவித்தலையும், x -ஆயத்திசையில்

குவிதலகற்றலையும் உருவாக்க வல்லதெனில், k -ஆனது சுழியத்தை விடக் குறையும். சமன்பாடு 9.11 –க்குரிய தீர்வு

$$x = A\ Cos\omega z + B\ Sin\ \omega z$$

ஆகும். எனவே,

$$\frac{dx}{dz} \equiv x' = -A\omega\ Sin\ \omega z + B\omega\ Cos\ \omega z \qquad (9.13)$$

z சுழியமதிப்பைப் பெறும் தொடக்க நிலையில், $x=x_0$, $y=y_0$ என்று கருதுவோமானால்,

$$\left.\begin{aligned} A &= x_0 \\ B &= x_0'\omega^{-1} \end{aligned}\right\} \qquad (9.14)$$

ஆகவே,

$$x = x_0\ Cos\ \omega z + x_0'\ \omega^{-1}\ Sin\ \omega z \qquad (9.15)$$

$$x' = -x_0\ \omega\ Sin\ \omega z + x_0'\ Cos\ \omega z \qquad (9.16)$$

ஆகும்.

மேலுள்ள இரு சமன்பாடுகளும், குவிக்கின்ற தளத்திற்கு உரியன. இவ்வாறே குவிதலகற்றுகின்ற தளத்திற்கு உரிய உறவுகளைச் சமன் 9.12 - லிருந்து,

$$y = y_0\ Cosh\ \omega z + y'_0\ \omega^{-1}\ Sinh\ \omega z \qquad (9.17)$$

$$y' = y_0\ \omega\ Sinh\ \omega z + y'_0\ Cosh\ \omega z \qquad (9.18)$$

எனப் பெறலாம்.

சமன்பாடுகள் 9.15 - ஐயும் 9.16 - ஐயும் மேட்ரிக்ஸ் *(Matrix)* வடிவில்,

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cos\omega z & 1/\omega Sin\omega z \\ -\omega Sin\omega z & Cos\omega z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix}$$

$$\therefore \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} \qquad (9.19)$$

என எழுதலாம்.

இத் தொடர்பில்,

$$F = \begin{pmatrix} Cos\omega z & 1/\omega\ Sin\omega z \\ -\omega Sin\omega z & Cos\omega z \end{pmatrix}$$

இதைப் போலவேசமன் 9.17 - ஐயும் 9.18 - ஐயும் மேட்ரிக்ஸ் வடிவில்,

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cosh\omega z & 1/\omega Sinh\omega z \\ \omega Sinh\omega z & Cosh\omega z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_0' \end{pmatrix}$$

அல்லது,
$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} y_0 \\ y_0' \end{pmatrix} \quad (9.20)$$

என எழுதலாம். சமன் 9.19 குவிக்கின்ற தளத்தில் துகளின் இயக்கத்தையும், சமன் 9.20 குவிதலகற்றுகின்ற தளத்தில் துகளின் இயக்கத்தையும் குறிக்கின்றன.

துகளானது முதல் நால் துருவ வில்லையினின்றும் வெளிவந்தவுடன் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியில் நுழைகின்றது. இந்நிலையில், நாம் பெற்ற தொடர்புகள் மாறும். காட்டாக, குவிக்கின்ற தளத்தினின்றும் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியில் துகள் நுழைவதாகக் கொள்வோம்.

புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியில் துகளியங்கும் போது x திசையில் துகள் பாதையின் சரிவு (*Slope*) dx/dz மாறிலியாகும். துகளானது வில்லையை விட்டுப் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியுள் s தூரம் கடந்தபின் உள்ள இடப்பெயர்ச்சி x_1 எனில்

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= x + sx' \\ x'_1 &= 0 + x' \end{aligned}\right\} \quad (9.21)$$

$$\therefore \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} \quad (9.22)$$

அல்லது,
$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} \quad (9.23)$$

ஆகவே, புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியில் துகள் s தூரம் இயங்குமானால் அவ்வியக்கத்தை மேட்ரிக்ஸ் A குறிக்கும்.

அதாவது,
$$A = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9.24)$$

இதனால், துகள் ஒன்றின் இயக்கத்தை மேட்ரிக்ஸ்களைப் பயன்படுத்தி எழுதலாம் என்பது தெளிவாகின்றது. துகள் இயங்கும் பகுதியில் மூன்றுவிதமான இயல்புகள் இருக்கலாம். அதாவது, அப்பகுதியில் குவிக்கின்ற காந்தப்புலம் செயல்படலாம், அல்லது குவிதலகற்றுகின்ற காந்தப்புலம் செயல்படலாம், அல்லது காந்தப்புல ஆதிக்கமே இல்லாதிருக்கலாம். இம்மூன்று இயல்புடைய பகுதிகளிலும் துகளின் இயக்கத்தை முறையே F, D, A, என்ற மேட்ரிக்ஸ்கள் குறிக்கின்றன.

வன்குவிப்பு வில்லையொன்றில் இரண்டு நால்துருவ வில்லைகள் உள்ளன. இரு வில்லைகளுக்கும் இடையே புல ஆதிக்கமற்ற s நீளமுள்ள பகுதியொன்று உள்ளது.

இப்பொழுது xz தளத்தில் துகளின் இயக்கத்தைக் கருதுவோம். முதல் வில்லை xz தளத்தில் குவிதலகற்றுவதாக உள்ளது, இரண்டாம் வில்லையோ xz தளத்தில் குவிப்பதாக உள்ளது. துகள் முதல் வில்லையில் இயங்கும் போது, xz தளத்தில் அதன் இயக்கத்தை மேட்ரிக்ஸ் D குறிக்கின்றது. ஒவ்வொரு நால் துருவ வில்லையின் நீளமும் L எனில் $z = L$ ஆகும். எனவே,

$$D = \begin{pmatrix} Cosh\omega L & 1/\omega Sinh\omega L \\ \omega Sinh\omega L & Cosh\omega L \end{pmatrix} \qquad (9.25)$$

அடுத்து, துகள் s நீளமுள்ள புல ஆதிக்கமற்ற இடைவெளியில் இயங்குவதை மேட்ரிக்ஸ் A குறிக்கின்றது. அடுத்து, xz தளத்தில் இரண்டாம் வில்லையில் துகளியங்கும்போது அதன் இயக்கத்தை மேட்ரிக்ஸ் F குறிக்கின்றது. எனவே,

$$F = \begin{pmatrix} Cos\omega L & 1/\omega Sin\omega L \\ -\omega Sin\,\omega L & Cos\omega L \end{pmatrix} \qquad (9.26)$$

ஆகவே, இவ்விரு நால் துருவ வில்லைகளும் அடங்கிய வன் குவிப்பு வில்லையில், xz-தளத்தில் துகளின் இயக்கத்தை P என்ற மேட்ரிக்ஸால் குறிப்போமானல்,

$$P = D\,A\,F \qquad (9.27)$$

அதாவது,
$$P = \begin{pmatrix} cosh\,\omega L & 1/\omega.\ Sinh\,\omega L \\ \omega\ Sinh\,\omega L & cosh\,\omega L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\,\omega L & 1/\omega\ Sin\,\omega L \\ -\omega\ Sin\,\omega L & Cos\,\omega L \end{pmatrix} \qquad (9.28)$$

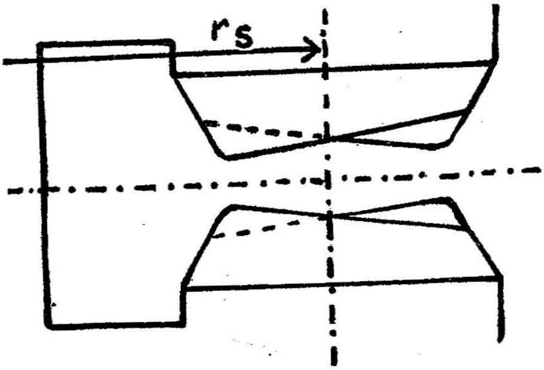
இவ்வாறே yz தளத்தில் துகளின் இயக்கத்திற்குரிய மேட்ரிக்ஸ்,

$$Q = F\,A\,D \qquad (9.29)$$

அதாவது,
$$Q = \begin{pmatrix} Cos\,\omega L & 1/\omega\ Sin\,\omega L \\ -\,\omega\ Sin\,\omega L & Cos\omega L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cosh\omega L & 1/\omega Snih\,\omega L \\ \omega\ Sinh\omega L & Cosh\omega L \end{pmatrix} \qquad (9.30)$$

9.6 புல அமைப்பும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளும்

வன்குவிப்புத் தத்துவம் தோன்றியபின், அதைப் பயன்படுத்தி ஆற்றல்மிகுந்த பொறிகளை உருவாக்க முயற்சிகள் மேற்கொள்ளப் பட்டன. மென்குவிப்புப் பொறிகளில் உள்ளதைப் போலவே இப் பொறிகளிலும் காந்தப் புலமானது காலத்தை யொட்டி மாறவல்லது. ரேடியோ அதிர்வெண்ணானது எலெக்ட்ரான் முடுக்கி களில் மாறிலியாகவும், புரோட்டான் முடுக்கிகளில் மாறக்கூடியதா கவும் அமைக்கப்படும். காந்தமுனைகளுக்கு இடையேயான காந்தப் புலமானது செறிவு மிகுந்து இருப்பதற்கேற்பப் படம் 9.10-ல் காட்டி யுள்ளவாறு காந்தமுனைகள் அமைக்கப்பட வேண்டும்.



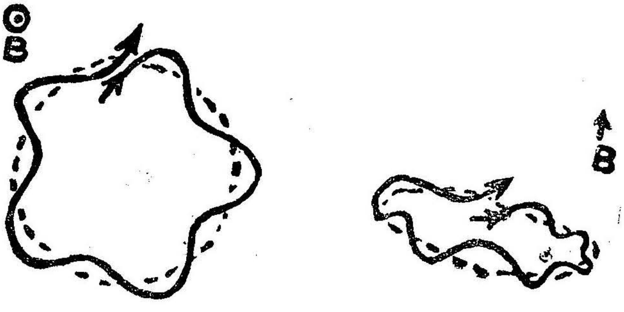
படம் 9.10 காந்தத் துருவ அமைப்பு

லிவிங்ஸ்டன், குராண்ட், ஸ்னைடர் மூவரும் முதல்முயற்சியாக வன்குவிப்பு முறையைப் பயன்படுத்தி புரோட்டான் சிங்க்ரோட் ரான்களை உருவாக்கினர். இவர்கள் உருவாக்கிய சிங்க்ரோட்ரான் 30 BeV ஆற்றல் தரவல்லது. புலவாட்டம் 4000 காஸ்/செ.மீ. ஆகும். துகள் கற்றையானது 0·03 மீட்டர் விட்டமுடைய குறுக்குவெட்டுத் தோற்றம் அமைந்த வெற்றிட அறையுள் இயங்கும். ஆனால், மென் குவிப்புப் பொறியில் பயன்படும் வெற்றிட அறையோ 1·5 மீட்டர் ×6 மீட்டர் குறுக்குவெட்டுப் பரப்புடையதாகும். ஆகவே, இரு பொறிகளையும் ஒப்பிடும்போது வன்குவிப்புப் பொறியில் வெற்றிட அறையானது மிகச் சிறியதாக அமைவது புலனாகும்.

மென்குவிப்புப் பொறிகளில் தடம் நிலைப்பாடுபெறப் புலஎண் $0<n<1$ ஆக அமைய வேண்டும் எனக் கண்டோம். இத்தகு தடநிலைப் பாடுடைய பொறிகளில் சுற்றொன்றில் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளின் எண்ணிக்கை ஒன்றைவிடக் குறைவாக இருக்கும். ஆகவே,

மென்குவிப்புப் பொறிகளில் அலைவுகள் வேகமாக நிகழ வாய்ப்பில்லை. (படம் 2.2 தட நிலைப்பாடு.)

வன்குவிப்புப் பொறிகளிலோ மிகச்சிறிய வெற்றிட அறையினுள் துகள்கள் இயங்குகின்றன; தவிரவும், இப்பொறிகளில் இருவாட்டக் காந்த அமைப்புகள் பயன்படுகின்றன என்று அறிவோம். இதனுல் தோன்றும், வலிமையான குவிக்கின்ற விசைகள் நடுநிலைத் தடத்தில் விரைந்த அலைவுகளை நிகழ்த்தும். இவ்வலைவுகள் ஆயத்திசையிலும் நிகழலாம், ஆரத்திசையிலும் நிகழலாம். ஆகவே,வன்குவிப்புப் பொறிகளில் ஒரு சுற்றை முடிக்கும் முன்பாகவே துகள், பல பீட்டாட்ரான் அலைவுகளை மேற்கொள்ளும். வாட்டத்தின் (*Gradient*) வலிமை மிகும்போது இந்த பீட்டாட்ரான் அலைவுகளும் அதிகமாகும்.



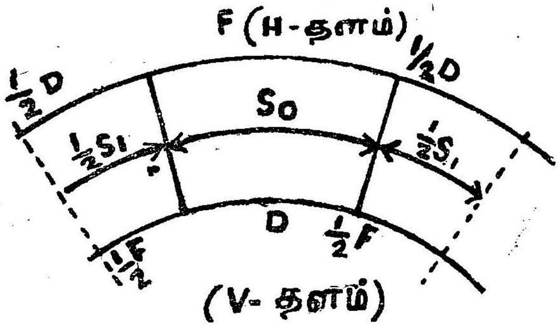
படம் 9.11 படம் 9.12

வன்குவிப்புப் பொறியில் பீட்டாட்ரான் அலைவுகள்

படம் 9.11-ல் துகள் ஆரத்திசையில் மேற்கொள்ளும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளையும், படம் 9.12-ல் ஆயத்திசையில் மேற்கொள்ளும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளையும் காணலாம். துகள்கள் இவ்விதம் இயங்கும்போது ஒவ்வொரு சுற்றின்போதும் முழு எண்ணிக்கையிலான அலைவுகளை மேற்கொள்ளுவதாகக் கருதுவோம். எடுத்துக்காட்டாக, ஒரு சுற்றில் நான்கு பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் நிகழ்வதாகக் கொள்வோம். இரண்டாம் சுற்றில் மீண்டும் அதே பாதையில் இயங்கும் துகள், மேலும் நான்கு பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கு உட்படும். ஆகவே, பல சுற்றுகளுக்குப் பின்னுல் துகள்களின் பீட்டாட்ரான் அலைவீச்சு மிகவும் மிகுதியாகிவிடும். இதனுல், வெற்றிட அறையின் சுவரில் மோதித் துகள்கள் இழந்து போக வாய்ப்புண்டு. எனவே, வன்குவிப்புப் பொறிகளில் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளினுல் இழப்பு ஏற்படாமல் காக்கவேண்டியது இன்றியமையாதது ஆகின்றது.

இனி, பீட்டாட்ரான் அலைவிற்குரிய அதிர்வெண்ணையும் நிலைப்பாடு குலையாதிருக்கத் தேவையான விதியையும் பெறுவோம். நேர்ப்

பகுதிகளில்லாமல், குவிக்கும் காந்தப் பகுதியும் குவிதலகற்றுகின்ற காந்தப் பகுதியுமுடைய சிங்க்ரோட்ரானைக் கருதுவோம். குவிக்கும் காந்தத்தின் நீளத்தை s_0 எனவும், குவிதலகற்றும் காந்தத்தின்



படம் 9.13 தொகுப்பின் அமைப்பு

நீளத்தை s_1 எனவும் குறிப்போம். $s_1/2$ நீளமுடைய குவிதலகற்றும் உறுப்பும், அதையடுத்து s_0 நீளமுடைய குவிக்கும் உறுப்பும், அதையடுத்து $s_1/2$ நீளமுடைய குவிதலகற்றும் பரப்பும் சேர்ந்ததை ஒரு 'தொகுப்பு' என்போம். இதைப்போன்ற பல தொகுப்புகள் சேர்ந்ததே சிங்க்ரோட்ரான் ஆகும்.

காட்டாக, கிடைத்தளத்தில் இதைப் போன்றதொரு தொகுப்பு அமைவதாகக் கொள்வோம். இதே நேரத்தில் செங்குத்துத் தளத்தில் (*Vertical plane*) $s_1/2$ நீளமுடைய குவிக்கின்ற உறுப்பும், s_0 நீளமுடைய குவிதலகற்றும் உறுப்பும், அடுத்து $s_1/2$ நீளமுடைய குவிக்கின்ற உறுப்பும் சேர்ந்ததே ஒரு தொகுப்பு ஆகும்.

இனி, கிடைத்தளத்தில் அமைந்துள்ள தொகுப்புகளின் அமைப்பைக் கருத்திற் கொண்டு பொறியின் இயல்பை ஆராய்வோம். நாம் முன்னர்க் கண்டவாறு குவிக்கும் உறுப்பு F மேட்ரிக்ஸாலும், குவிதலகற்றும் உறுப்பு D மேட்ரிக்ஸாலும் குறிக்கப்பெறும் என்பதை என்பதை அறிவோம்.

எனவே $s_1/2$ நீளமுடைய குவிதலகற்றும் பகுதியில் துகளியக்கத்தை D/2 மேட்ரிக்ஸால் குறிக்கலாம்.

அதாவது,
$$\frac{D}{2} = \begin{pmatrix} \cosh \omega s_1/2 & 1/\omega \sinh \omega s_1/2 \\ \omega \sinh \omega s_1/2 & \cosh \omega s_1/2 \end{pmatrix} \qquad (9.31)$$

s_0 நீளமுடைய குவிக்கும் பகுதியில், துகளியக்கத்தை F எனும் மேட்ரிக்ஸால் குறிக்கலாம்.

அதாவது, $$F = \begin{pmatrix} Cos\,\omega s_0 & 1/\omega\ Sin\ \omega s_0 \\ -\omega\ Sin\ \omega s_0 & Cos\ \omega s_0 \end{pmatrix} \quad (9.32)$$

ஆகவே, கிடைத்தளத்தில் ஒரு தொகுப்பினூடே துகளினியக்கத்தை H என்ற மேட்ரிக்ஸால் குறிப்போமானல்

$$H = \frac{D}{2} F \frac{D}{2}$$

அல்லது,

$$H = \begin{pmatrix} Cosh\ \omega\ s_1/2 & 1/\omega\ Sinh\ \omega s_1/2 \\ \omega\ Sinh\ \omega s_1/2 & Cosh\ \omega\ s_1/2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Cos\ \omega s_0 & 1/\omega\ Sin\omega s_0 \\ -\omega\ Sin\ \omega s_0 & Cos\omega s_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cosh\ \omega s_1/2 & 1/\omega\ Sinh\ \omega s_1/2 \\ \omega\ Sinh\ \omega s_1/2 & Cosh\ \omega s_1/2 \end{pmatrix} \quad (9.33)$$

இவ்வாறே, செங்குத்துத் தளத்தில் உள்ள தொகுப்பொன்றைக் கருதுவோமானல், காந்தப்பகுதிகளின் வரிசை நேர்மாருக இருக்கும். ஆகவே, செங்குத்துத் தளத்தில் ஒரு தொகுப்பினூடே துகளியங்குவதை V எனும் மேட்ரிக்ஸால் குறித்தால்,

$$V = \frac{F}{2} D \frac{F}{2}$$

ஆகும்.

அதாவது, $$V = \begin{pmatrix} Cos\ \omega s_1/2 & 1/\omega\ Sin\ \omega s_1/2 \\ -\omega\ Sin\ \omega s_1/2 & Cos\ \omega s_1/2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Cosh\ \omega s_0 & 1/\omega\ Sinh\ \omega s_0 \\ \omega\ Sinh\ \omega s_0 & Cosh\ \omega s_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cos\ \omega s_1/2 & 1/Sin\ \omega s_1/2 \\ -\omega\ Sin\ \omega s_1/2 & Cos\ \omega s_1/2 \end{pmatrix} \quad (9.34)$$

எனவே, கிடைத்தளத்தில் தொகுப்பொன்றின் இயல்பைக் குறிக்கும் மேட்ரிக்ஸ் H-ஐயும், செங்குத்துத் தளத்தில் அதன் இயல்பைக்

குறிக்கும் மேட்ரிக்ஸ் V -ஐயும் கருத்திற்கொண்டு நிலைப்பாட்டிற்கான விதிகளைப் பெறுவோம்.

சமன் 9.33 லிருந்து,

$$H = \begin{pmatrix} Cosh\ \omega s_1/2 & 1/\omega\ sinh\ \omega s_1/2 \\ \omega\ Sinh\ \omega s_1/2 & Cosh\ \omega s_1/2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} (Cos\ \omega s_0\ Cosh\ \omega s_1/2 + Sin\ \omega s_0 . Sin\ \omega s_1/2) & 1/\omega (Cos\ \omega s_0 . Sinh\ \omega s_1/2 + Sin\ \omega s_0 . Cosh\ \omega s_1/2) \\ (-\omega\ Sin\ \omega s_0 .\ Cosh\ \omega s_1/2 + \omega\ Cos\ \omega s_0 .\ Sinh\ \omega s_1/2) & (-Sin\ \omega s_o\ Sinh\ \omega s_1 + Cos\ \omega s_0\ Cosh\ \omega s_1/2 \end{pmatrix}$$

$$\therefore H = \begin{pmatrix} Cos\ \omega\ s_0\ Cosh\ \omega s_1 & 1/\omega\ (Sin\ \omega s_0 + 2\ Cos \omega s_0\ Sinh\ \omega s_1/2\ Cosh\ \omega s_1/2) \\ \omega\ (2 Cos\ \omega s_0\ Sinh\ \omega s_1/2\ Cosh \omega s_1/2 - Sin\ \omega s_0) & Cos \omega s_0\ Cosh\ \omega s_1 \end{pmatrix} \tag{9.35}$$

அல்லது $$H = \begin{pmatrix} Cos \mu_H & 1/k_H\ \ Sin\ \mu_H \\ -k_H\ \ Sin \mu_H & Cos\ \mu_H \end{pmatrix} \tag{9.36}$$

இதில் $Cos \mu_H = Cos\ \omega s_o\ \ Cosh\ \omega s_1$ (9.37)

ஆகும்.

இதைப் போலவே செங்குத்துத்தள இயக்கத்திற்கான மேட்ரிக்ஸ்,

$$V = \begin{pmatrix} Cos \mu_V & 1/k_V\ Sin \mu \\ -k_V\ Sin \mu_V & Cos \mu_V \end{pmatrix} \tag{9.38}$$

இதில், $Cos \mu_V = Cos\ \omega\ s_1\ \ Cosh\ \omega s_0$ (9.39)

ஆகும்.

9.36, 9·38 ஆகிய இரு சமன்பாடுகளிலும் k_H, k_V என்பவை திரிகோண கணிதச் சார்பெண், அதிபரவளையச் சார்பெண் ஆகியவற்றைக் கொண்டதாகும் *(Combination of Trignometrical and Hyperbolic Functions)*.

இதுவரை, நாம் மேற்கொண்ட வழிமுறைகள் ஏற்புடையதாக இருக்கவேண்டுமெனில்,

$$-1 < Cos\, \mu_H < 1 \quad (9.40)$$

$$-1 < Cos\, \mu_V < 1 \quad (9.41)$$

ஆக அமைய வேண்டும். இவைதான் தட நிலைப்பாட்டிற்குரிய விதிகளாகும்.

இவ்வாறன்றி, குவிக்கும் காந்தப் பகுதியில் 'ω' வின் மதிப்பை ω_0 எனவும் குவிதலகற்றும் காந்தப் பகுதியில் 'ω' வின் மதிப்பை ω_1 எனவும், குறிப்போமானால், சமன்கள் 9.37 -ம், 9.39 -ம் பின் வருமாறு மாறலாம்.

$$Cos\mu_H = Cosh\, \omega_1 s_1\, Cos\omega_0 s_0 + \tfrac{1}{2}\left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1}\right) Sin\, \omega_0 s_0\, Sinh\, \omega_1 s_1 \quad (9.42)$$

$$Cos\mu_V = Cos\, \omega_1 s_1\, Cosh\omega_0 s_0 + \tfrac{1}{2}\left(\frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{\omega_1}{\omega_0}\right) Sinh\omega_0 s_0\, Sin\, \omega_1 s_1 \quad (9.43)$$

$Cos\mu_H$ - ம் $Cos\mu_V$ - ம் மேற்கண்ட மதிப்புகளை அடைந்தாலும் நிலைப்பாட்டிற்கு உரிய விதி மாறாது. ஆகவே, வன்குவிப்புப் பொறிகளில் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளினால் நிலைப்பாடு தோன்ற, தொடர்புகள் 9.40 - ம், 9.41 – ம் நிறைவு பெறவேண்டும் என்பது தெளிவு.

தொகுப்பொன்றில் ஏற்படும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளால் செங்குத்துத் தளத்திலும் கிடைத்தளத்திலும் கலைக்கோண மாறுபாடுகள் நிகழலாம். கிடைத்தளத்தில் தோன்றும் கலைக்கோண மாறுபாட்டை μ_H – ம் செங்குத்துத் தளத்தில் தோன்றும் கலைக்கோண மாறுபாட்டை μ_V -ம் குறிக்கின்றன.

9.7. கழுத்துக் கச்சைப் படம்: (Necktie Diagram)

இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரானில் N தொகுப்புகள் இருப்பதாகக் கருதுவோம். துகளானது பொறியுள் ஒரு சுற்றை முடிக்கும்போது N தொகுப்புகளில் இயங்கி இருக்கும். ஒரு தொகுப்பில் இயங்கும் காரணத்தால் ஏற்படக்கூடிய கலைக்கோண மாறுபாடு μ எனில், ஒரு சுற்றில் துகள் அடைந்த கலைக்கோண மாறுபாடு $N\mu$ ஆகும். எனவே, முழுச் சுற்றொன்றில் ஏற்படக்கூடிய பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் Q - எனில்,

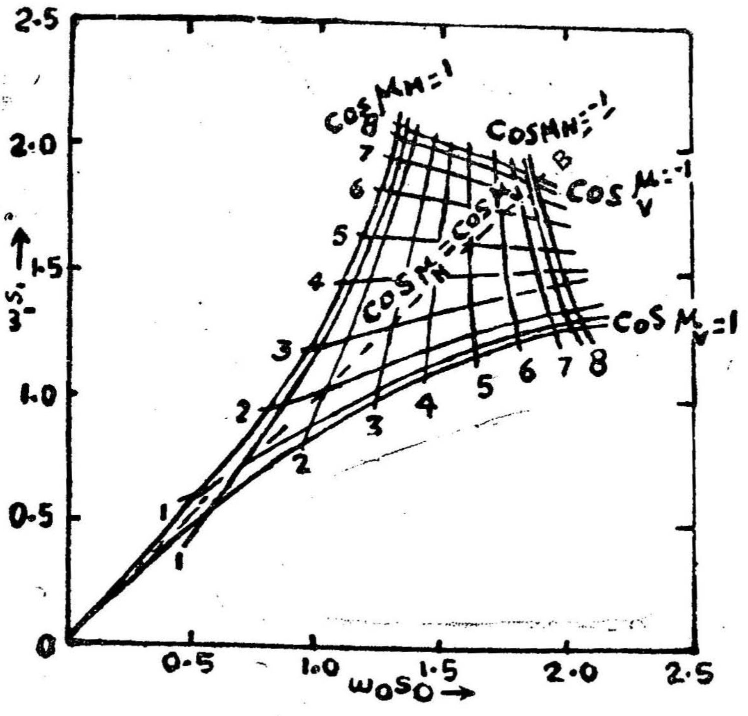
$$Q = \frac{N\mu}{2\pi} \quad (9.44)$$

ஆகும். ஒத்திசைவு நிலவ வேண்டுமெனில், இந்த Q ஒரு முழு எண்ணாக அமைய வேண்டும். Q ஓர், எண் மதிப்பை (l)ப் பெறுமானால்

$$\left.\begin{aligned} Q = l &= \frac{N\mu}{2\pi} \\ \therefore \mu &= \frac{2l\pi}{N} \end{aligned}\right\} \quad (9.45)$$

தொடர்புகள் 9.40, 9.41-லிருந்து நிலைப்பாட்டு எல்லையில் μ - ன் பெரும மதிப்பு π என அறியலாம். இந்த மதிப்பைச் சமன் 9.45 -ல் பதிலீடு செய்ய $l = 1, 2......, \frac{1}{2} N$ என்ற மதிப்புகள் பெறலாகும்.

சமன் 9.42 - ன் படி அமையும் $Cos\mu_H$ -ன் மதிப்பானது +1 க்கும் −1க்கும் இடையில் அமையவேண்டும். $Cos\mu_H$ − ன் மதிப்புகள் இவ்வரம்பிற்குள் அமைவதற்கேற்ப, $\omega_1\ s_1$, $\omega_0\ s_0$ ஆகியவற்றின் மதிப்புக்கள் அமைய வேண்டும். $\omega_1\ s_1$, $\omega_0\ s_0$ ஆகியவற்றின் அத்தகைய மதிப்புகளைக் கணக்கிடுதல் எளிதன்று. $Cos\mu_H$ −ன் மதிப்பானது −1 க்கும் +1 க்கும் இடையே அமைவதற்கேற்ப அமைந்த $\omega_1 s_1$, $\omega_0\ s_0$ மதிப்புகளுக்கிடையே வரைபடம் ஒன்றை வரைவோம், அவ்வாறே, $Cos\mu_V$ - ன் +1க்கும் −1க்கும் இடையிலமையுமாறு



படம் 9.14 கழுத்துக்கச்சைப் படம்

அமைந்த $\omega_1\ s_1$, $\omega_0\ s_0$ மதிப்புகளுக்கு இடையேயான வரைபடம் ஒன்றையும் வரைவோம். அவ் வரைபடங்களின் அமைப்பைப் படம் 9.14 - ல் காணலாம். அதன் வடிவம் காரணமாக அவ் வரைபடம் கழுத்துக்கச்சைப் படம் (*Necktie diagram*) எனப்படும்.

$\omega_0 s_0$ க்கும் $\omega_1 s_1$ க்கும் இடையேயான வரைபடத்தில் $Cos\mu_H$, $Cos\mu_V$ ஆகியவை - 1க்கும் +1க்கும் இடையேயான மதிப்புகளைப் பெறும் பகுதி காட்டப்பட்டுள்ளது (நிழலிடப்பட்ட பகுதி). இப்பகுதியில் மட்டுமே சமன்பாடுகள் 9.42, 9.43 பொருந்தும்; பிற இடங்களில் பொருந்தா. அதாவது இப்பகுதியில் மட்டுமே, நிலைப்பாடும் ஆரத்திசை நிலைப்பாடும் ஒருங்கிணைந்து நிலவும். இனி,

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= s_0 = s \\ \omega_1 &= \omega_0 = \omega \end{aligned}\right\} \tag{9.46}$$

எனில், $Cos\mu_H = Cos\mu_V$ ஆகும். கழுத்துக் கச்சைப் படத்தின் மூலைவிட்டம் OB, இந் நிலையைக் குறிக்கின்ற வரை கோடாகும். O-ல் $Cos\mu_H = Cos\mu_V = +1$ ஆகும். B-யிலோ $Cos\mu_H = Cos\mu_V = -1$ ஆகும். ஆகவே O-விற்கும் B-க்கும் இடைப்பட்ட ஏதாவதொரு புள்ளியில் $Cos\mu_H$-ம் $Cos\mu_V$-ம் சுழியமாக வேண்டும். அப் புள்ளியைப் பின்வருமாறு பெறலாம்.

சமன்கள் 9.37, 9.46 ஆகியவற்றிலிருந்து,

$$Cos\mu_H = Cos\,\omega s \; Cosh\,\omega s \tag{9.47}$$

'r' ஆரமுடைய வட்டத்தில் $2N$ காந்தங்கள் இருப்பதாகக் கருதுவோம். ஒரு காந்தத்தின் நீளம் s ஆதலால்

$$2\pi r = 2sN \tag{9.48}$$

அல்லது,

$$s = \frac{\pi r}{N} \tag{9.49}$$

ஆகும். மேலும், புல எண் $n = -\dfrac{dB}{B} \Big/ \dfrac{dr}{r}$

$$= -\frac{r}{B}\;\frac{dB}{dr}$$

$$\therefore \frac{n}{r^2} = -\frac{1}{Br}\;\frac{dB}{dr}$$

$$= -\frac{q}{p}\;\frac{dB}{dr}$$

$$\therefore \frac{n}{r^2} = -\omega^2$$

ω^2, குவிக்கின்ற காந்தப் பகுதியில் நேர்க்குறியுடையதாகவும், குவிதலகற்றும் காந்தப் பகுதியில் எதிர்க்குறியுடையதாகவும் அமையும்.

எனவே, குவிக்கின்ற காந்தப் பகுதியைக் கருத்தில் கொள்வோமாயின்,

$$\frac{n}{r^2} = \omega^2$$

அல்லது,
$$\omega = \left(\frac{n}{r^2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (9.50)$$

ஆகும். ஆகவே, சமன்கள் 9.49, 9.50 - லிருந்து,

$$\omega s = \left(\frac{n}{r^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \frac{\pi r}{N}$$

அல்லது,
$$\omega s = \frac{\pi n^{\frac{1}{2}}}{N}$$

ஆகும். ஆகவே, சமன் - 9.47 - லிருந்து,

$$Cos\mu_H = Cos\left(\frac{\pi n^{\frac{1}{2}}}{N}\right)Cosh\left(\frac{\pi n^{\frac{1}{2}}}{N}\right) \qquad (9.51)$$

ஆகும்.

சமன் 9.51 ல் $\frac{n}{N^2} = \frac{1}{4}$ என்ற மதிப்பை அடையும்போது $Cos\ (\pi n^{\frac{1}{2}}/_N)$ சுழியமாதலால் $Cos\mu_H$ சுழியமாகும். $n/_{N^2}$ -ன் இம் மதிப்பிற்கு $\omega_1 s_1 = \omega_0 s_0 = \omega s = 1{\cdot}57$ ஆகும். இம் மதிப்பிற்குரிய (1·57) புள்ளியானது கழுத்துக் கச்சை படத்தின் அகலமான பகுதிக்கு அண்மையில் உள்ளதைப் படம் 9.14 - லிருந்து அறியலாம். இந்தப் புள்ளியில் $Cos\mu_V$ -ம் சுழியமாகும் இப் புள்ளி இயக்கும் புள்ளி *(Operating Point)* என அழைக்கப்படும். எனவே, இந்த இயக்கும் புள்ளியால் வரையறுக்கப்படும் அளபுருபுகளைப் பொறி பெறும்போது $Cos\ \mu_H$, $Cos\ \mu_V$ ஆகிய இரண்டுமே சுழியமாகும்.

இருவாட்டந்தரு தத்துவம் எடுத்துரைக்கப்பட்டவுடன், அதை நடைமுறையில் கையாளப் பலர் ஆர்வமுடன் முனைந்தனர். புல எண்ணின் மதிப்பு மிகுமாயின் வன்குவிப்பு விசையின் வலுவும் அதிகமாகும். ஆகவே, n-னின் மதிப்பை ஆயிரக்கணக்கில் அதிகரிக்க அறிவியலாளர் முனைந்தனர். ஆனால், இவ்விதம் மிக உயர்ந்த புலஎண் மதிப்பை அமைக்கக் காந்த அமைப்புகளைச் சீரமைப்பது அரிதாகும். காந்த இணைப்புச் சட்டங்களில் வெவ்வேறு பகுதிகளில் வெவ்வேறு வகையில் காந்தத் தெவிட்டுநிலை தோன்றுவதாலும், துகள் உட்செலுத்தப்பட்டதிலிருந்து இறுதிஆற்றலை அடையும்வரை சீரான புலத்தை நிறுவுவது கடினமான பணி ஆவதாலும், புல எண்ணின் மதிப்பை மிக அதிகமாக்குவதில் இடையூறுகள் தோன்றின.

ஆகவே, புல எண்ணின் மதிப்பைத் தேர்ந்தெடுக்கும் போது, அதனால் அமையும் இயக்கும் புள்ளியானது கழுத்துக் கச்சையின் அகலமான பகுதிக்கு அருகில் அமையுமாறு தேர்ந்தெடுத்தல் மரபு. அவ்விதம் அமையும்போதுதான் நிலைப்பாடு நிலவும். ஆனால், மேற்கூறிய வகையில் நிலைப்பாட்டை நிலவுதல் எளிதன்று.

சமன் 9.45-ன் படி, $l=1,2,\ldots\ldots,\frac{1}{2}N$ என்ற மதிப்பைப் பெறுமானால், ஒவ்வொரு சுற்றின்போதும் முழு எண்ணிக்கையிலான பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் நிகழும் என்றும், மேலும் இந்த பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் தட இயக்கத்துடன் (*Orbital Motion*) ஒத்திசைவு பெறும் வாய்ப்புண்டு என்றும் கண்டோம். இவ்விதம் ஒவ்வொரு சுற்றிலும் முழு எண்ணிக்கையிலான பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் நீடிக்குமானால், துகள்களில் பெரும்பகுதி வெற்றிட அறையின் சுவரில் மோதி இழந்துபோகும் வாய்ப்புண்டு எனவும் கண்டோம். எனவே, இத்தகு ஒத்திசைவு நிகழாமல் காக்க வேண்டியது அவசியமாகின்றது. இவ்வித ஒத்திசைவு நீடிக்கும் வாய்ப்பிருந்தால் கழுத்துக் கச்சைப் படம்கூட நிலைப்பாட்டுப் பகுதியில் பல ஒத்திசைவுக் கோடுகளைப் பெறும், இந்த ஒத்திசைவுக் கோடுகள் (*Resonance Lines*) $l=1,2,\ldots\ldots\ldots,1/2\,N$ என்னும் மதிப்புகளுக்கேற்ப சமன்-9.45-ல் μ அடையும் மதிப்புகளைப் பொறுத்திருக்கும். இந்த ஒத்திசைவுக் கோடுகள் குறுக்கும் நெடுக்குமாகக் கழுத்துக் கச்சை படத்தில் பின்னலிடுவதைக் காணலாம் (படம் 9.14). இந்தக் காரணத்தால், பொறி நிலைப்பாடு பெற, இயக்கும் புள்ளியானது ஒத்திசைவுக் கோடுகளுக்கிடையே உள்ள உருச்சிதைந்த சதுரத்திற்குள்ளேயே அமையவேண்டும் எனக் கூறலாம். இயக்கும் புள்ளியானது அவ்வாறு அமையாமல் ஏதாவதொரு ஒத்திசைவுக் கோட்டை நெருங்குமானால், பெரும வீச்சுடைய பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கு உட்பட்டுத் துகள்களை இழக்க நேரிடும். ஆகவே, நிலைப்பாட்டுப் படத்தில் இந்த ஒத்திசைவுக் கோடுகளும் சேர்ந்து இயக்கும் புள்ளியை வரையறுக்கின்றன. இத்தகு ஒத்திசைவுக் கோடுகள் பொறியின் இயக்கத்திற்கு ஊறு விளைவிக்க வல்லன ஆதலால், இவை தவிர்நிலைக் கோடுகள் (*Forbidden Lines*) எனப்படும்.

இதுகாறும் கண்டவற்றிலிருந்து இயக்கும் புள்ளியானது $\omega_1\, s_1$ க்கும் $\omega_0\, s_0$-க்கும் இடையே வரையப்படும் பல்வேறு வரைகோடுகளினால் அமையும் உருச்சிதைந்த சதுரத்திற்குள்தான் அமைய வேண்டும் என்றும், அது ஒத்திசைவுக் கோடுகளை அணுகாமல் இருப்பதற்கேற்பப் பொறியின் அளபுருபுகள் அமையவேண்டும் எனவும் அறிந்தோம்.

புல எண் n-ன் மதிப்புகள், தெவிட்டுநிலை காரணமாகப் பாதிக்கப் படலாம். எனவே, பொறி இயங்கும்போது இயக்கும் புள்ளியும் மாற்றமடையலாம். ஆகவே, ஒத்திசைவுக் கோடுகளால் அமையும் சதுரம் போதிய அளவு பெரிதாக இருக்கவேண்டும். இல்லையெனில், புள்ளி ஒத்திசைவுக்கோட்டை நெருங்கிப் பொறியின் இயக்கத்தில் இழப்புகளைத் தோற்றுவிக்கலாம்.

இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரானிலுள்ள தொகுப்புகளின் எண்ணிக்கையை மிக அதிகமாக்கினுல், ஒத்திசைவுக் கோடுகளின் எண்ணிக்கையும் அதிகமாகும். ஆகவே, ஒவ்வொரு சதுரத்தின் பரப்பும் மிகச் சிறிதாகும். எனவே, இயக்கும் புள்ளியை அந்தச் சிறு சதுரத்திற்கு உள்ளேயே அமைப்பது கடினமாகும். இதன் பயனுய்ச் சிங்க்ரோட்ரானில் உள்ள கூறுகளின் எண்ணிக்கையை விருப்பப் படியெல்லாம் அதிகமாக்க முடியாது.

மேற்கண்ட ஒத்திசைவு விளைவுகளினுல் இரு வாட்டந்தரு தத்துவமே பயனற்றது என்று ஒதுக்கிவிட முடியாது. இருவாட் டந்தரு தத்துவத்திற்கு இந்த ஒத்திசைவுக் கோடுகள் வரம்பு விதிக்கின்றனவே அல்லாமல், அத் தத்துவத்தையே பயனற்றதாக்கி விடவில்லை என்பதை உணரவேண்டும்.

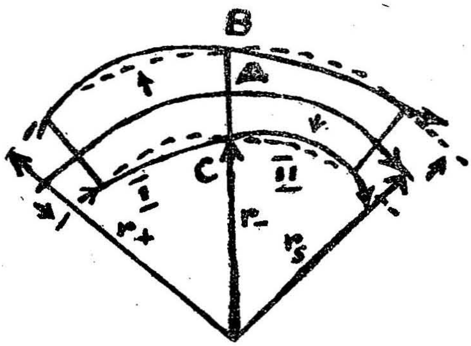
மென்குவிப்புப் பொறிகளில் 3-லிருந்து 10 *BeV* வரை துகள்களை முடுக்கலாம். இந்த ஆற்றல் எல்லைக்குள் வெவ்வேறு உந்தமுடைய துகள்களையும் ஏற்று ஆற்றல் தரவல்லதாக மென்குவிப்புப் பொறிகள் விளங்கும். ஆனுல், 15 *BeV* ஆற்றலுக்கும் அதற்கும் மேற்பட்ட ஆற்றலுக்கும், வன்குவிப்புப் பொறிகளே பயனுள்ளவை.

9.8. கலைக்கோண நிலைப்பாடும் திரிவுநிலை ஆற்றலும்:
(Phase Stability and Transition Energy)

இருவாட்டப் பொறிகளில் இசைவுறு துகளுக்குரிய வட்டத் தடத்தில் மட்டுமே புலம் சீராக இருக்கும். இசைவுறுத் துகள்கள் இசைவுறு துகள்களைவிடக் குறைந்த ஆற்றலும் பெறலாம், அல்லது அதிக ஆற்றலும் பெறலாம். ஆகவே, இசைவுறுத் துகள்கள் தம் இயல்பிற்கேற்ப வெவ்வேறு காந்தப் பகுதிகளில் வெவ்வேறு விதமான புலங்களைச் சந்திக்கும். எனவே, அவற்றின் பாதை இசைவுறு துகள் களின் பாதையைப் போல் அமையாது. இசைவுறுத் துகள்களின் பாதையின் வளைவு ஆரம், அவை சந்திக்கும் காந்தப் புலங்களின் மதிப்பிற்கேற்ப மாறுபடும்.

இசைவுறுத் துகளின் பாதை படம் 9.15-ல் உள்ளதைப்போல் அமையும். படத்தில் A,B,C என்பன முறையே இசைவுறு துகள்,

இசைவுறுதுகளைவிட ஆற்றல் மிகுந்த இசைவுருத் துகள், ஆற்றல் குறைந்த இசைவுருத்துகள் ஆகியவற்றின் தடங்களைக் குறிக்கின்றன.



படம் 9.15 வன்குவிப்புப் பொறியில் நடுநிலைத் தடங்கள்

அம்புக் குறிகள் புலம் உயரும் திசையைக் குறிக்கின்றன. இந்தப் படத்திலிருந்து, இசைவுருத் துகள்கள் தம்முடைய சராசரி ஆயத்திசை நிலைப்பாட்டைக் குறிக்கும் சுற்றளவை யொட்டி அலைவிற்கு உட்படுகின்றன என்பது புலனுகும். இந்த அலைவுகளுக்கும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளுக்கும் தொடர்பில்லை என்பதைக் கவனத்தில் கொள்ள வேண்டும். இசைவுருத் துகளின் அலைபாய்கின்ற பாதையே அதன் நடுநிலைத் தடம் ஆகும்.

காந்தப் பகுதிகள் I-ம் II-ம் பெற்றுள்ள புலவாட்டங்கள் ஒரே மதிப்புடையதாகவும் வெவ்வேறு குறியுடையதாகவும் உள்ளன. முதல்பகுதியில் அமைந்துள்ள காந்தப் புலமானது ஆரத்திசையில் அதிகரிக்கும். இரண்டாம் பகுதியில் புலமானது ஆரத்திசையில் குறையும். இசைவுருத் துகள்கள் முதல்பகுதியில் இயங்கும்போது உணரும் சராசரிப் புலமிகுதிப்பாடு (படம்-9.15) இரண்டாம் பகுதியில் இயங்கும்போது உணரும் சராசரிப் புல வீழ்ச்சியால் சரி செய்யப் படலாம். புலம் தோற்றுவிக்கும் நிகர விளைவு இசைவுறு துகளின் மேலுள்ள விளைவைப் போலவே அமையும்.

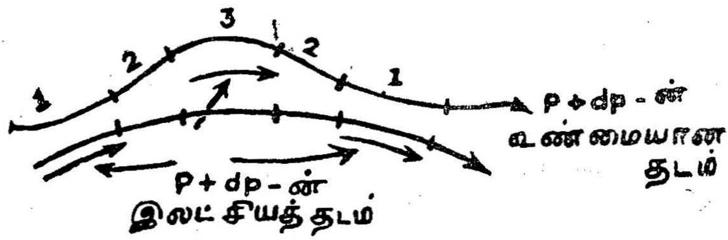
எடுத்துக்காட்டாக இசைவுறுதுகளைவிட உயர்ந்த ஆற்றல் பெற்ற இசைவுருத் துகளைக் கருதுவோம். இதன் தட ஆரம் $r+$ என இருக்கட்டும் (படம் 9.15). முதல் காந்தப் பகுதியை அணுகும் துகள் ஆரத்திசையில் அதிகரிக்கும் காந்தப் புலத்தைச் சந்திக்கும். எனவே, இசைவுறு துகளின் தடத்தை விட்டு விலகும். அடுத்த காந்தப் பகுதியில் (II) நுழையும்போதோ ஆரத்திசையில் குறைகின்ற காந்தப் புலத்தைச் சந்திப்பதால் இசைவுறு துகளின் தடத்தை நோக்கி நகரும்.

ஆகவே, இரு பகுதிகளிலும் இந்த இசைவுறுத் துகளானது r_+-க்குரிய காந்தப் புலத்தைவிட அதிக மதிப்புள்ள காந்தப்புலத்தைச் சந்திக்கும் என்பதை உணரலாம். ஆரத்திசையில் ஏற்படும் இத்தகு இடப்பெயர்ச்சிகளுக்குத் தகுந்தவாறு இந்த இசைவுறுத் துகளின் ஆற்றலும் வேறுபடும். அதாவது, இந்த இசைவுறுத் துகளானது நடுநிலைத்தடம் சார்ந்த அலைவுகளுக்கு உட்படுகின்றது எனலாம்.

வன்குவிப்புப் பொறிகளில் துகள்களின் இயக்கத்தை ஆராய உந்த இறுக்கம் என்ற பயனுறு கருத்தைக் கருதுவோம். கலைக்கோண நிலைப்பாடு பற்றி ஆராய இந்த உந்த இறுக்கம் 'a' பெரிதும் துணை செய்யும் என்பதை முன்னரே கண்டுள்ளோம்.

9.9. உந்த இறுக்கத்திற்கான சமன்பாடு:

பந்தயப் பாதை *(Race-Track)* சிங்க்ரோட்ரானைக் கருதுவோம். இந்த சிங்க்ரோட்ரானில் காந்தப் பகுதிகளும் நேர்ப் பகுதிகளும் *(Straight Sections)* உள்ளன என்று கண்டோம். இந்தப் பொறியில் குவிதலகற்றும் காந்தம், அதையடுத்த நேர்ப்பகுதி, குவிக்கின்ற காந்தம் ஆகிய இவை மூன்றும் ஒரு தொகுப்பை அமைக்கின்றன. இதைப்போன்ற பல தொகுப்புக்களைக் கொண்டதே பந்தயப் பாதை சிங்க்ரோட்ரான் ஆகும். பொறியின் மையத்திலிருந்து குறிப்பிட்டதொரு தூரத்தில் குவிதலகற்றும் காந்தப் பகுதியிலுள்ள காந்தப்புலம்



படம் 9·16 p-ன் தடமும் p+dp-ன் தடமும்

B எனக் குறிப்போம். குவிக்கின்ற காந்தப் பகுதியும் இதே மதிப்பைத் தான் பெற்றிருக்கும். எனினும், அவ்விரண்டு பகுதிகளில் அமைந்துள்ள வாட்டங்களும் வெவ்வேறான மதிப்புடையன. இப் பொறியில் நேர்ப் பகுதிகள் இல்லாவிட்டால் இசைவுறு துகளின் தடம் ஒரு வட்டத் தடமாக அமையும். நேர்ப்பகுதிகளும் இருக்குமானால் இதன் பாதையானது வட்ட வில்களும் நேர்கோடுகளும் இணைந்ததாக அமையும் படம் (படம் 9.16). இசைவுறுதுகளின் உந்தம் p எனில், அதன் தடம் p தடம் என அழைக்கப் பெறும்.

இசைவுறாத் துகளின் உந்தம் $(p+dp)$ எனக் கொள்வோம். இந்தத் துகள் நிலைப்பாடு பெற Br-ன் மதிப்பு, அதிகமானதாக இருக்க வேண்டும். ஆகவே, இசைவுறு துகளின் தட ஆரம் r- எனில், படம் 9.15 -ல் உள்ளவாறு ஆரத்திசையில் குவிக்கின்ற காந்தப் பகுதியில் இசைவுறாத் துகளின் தட ஆரமானது r-ஐ விட அதிகமாகவும், ஆரத்திசையில் குவிதலகற்றும் காந்தப் பகுதியில் இசைவுறாத் துகளின் தட ஆரம் r-ஐ விடக் குறைவாகவும் அமையும். எனவே, r-க்கு வெளியேயுள்ள வட்ட வில், r-க்கு உள்ளே அமையும் வட்ட வில், இவ்விரண்டையும் இணைக்கும் நேர்ப்பகுதி ஆகிய மூன்றும் இணைந்த கோடே இசைவுறாத் துகளின் தடமாகும். இத்தடம் $(p+dp)$-ன் உண்மையான தடம் எனப் பெறும்.

இனி, இசைவுறு துகளின் தடத்தை ஆதாரமாகக் கொண்டு இசைவுறாத் துகளின் இயக்கத்தை ஆராய்வோம். நடுநிலைத் தடத்திலிருந்து ஏற்பட்ட இடப்பெயர்ச்சி x எனில்,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 (1-n)\, x = r\, \omega^2 \frac{dp}{p} \qquad (9.52)$$

ஆகும். இந்தச் சமன்பாடு $(p+dp)$ உந்தமுடைய இசைவுறாத்துகளின் இயக்கத்தைக் குறிப்பதாகும்; r, ω இரண்டும் இசைவுறுதுகளுக்குரியன.

dt நேரத்தில் துகள் dL தூரத்தைக் கடக்குமெனில் $dt = dL/v$.

$$\therefore\ \frac{d^2x}{dL^2} + \frac{(1-n)x}{r^2} = \frac{1}{r}\frac{dp}{p} \qquad (9.53)$$

வன்குவிப்புப் பொறிகளில் புலஎண்ணின் மதிப்பு மிகப் பெரியதாதலால், சமன் 9.53 -ஐ

$$\frac{d^2x}{dL^2} - \frac{n}{r^2}\, x = \frac{1}{r}\frac{dp}{p} \qquad (9.54)$$

என எழுதலாம்.

ஆரத்திசையில் குவிக்கின்ற காந்தப் பகுதிக்குரிய புலஎண் n_2, ஆரத்திசையில் குவிதலகற்றுகின்ற காந்தப் பகுதிக்குரிய புலஎண் n_1, முதல்காந்தப் பகுதியில் துகள் அடைந்த இடப்பெயர்ச்சி x_1, இரண்டாம் காந்தப் பகுதியில் துகள் அடைந்த இடப்பெயர்ச்சி x_2 எனில்,

$$\frac{d^2x_1}{dL^2} - \frac{n_1}{r^2}\, x_1 = \frac{1}{r}\frac{dp}{p} \qquad (9.55)$$

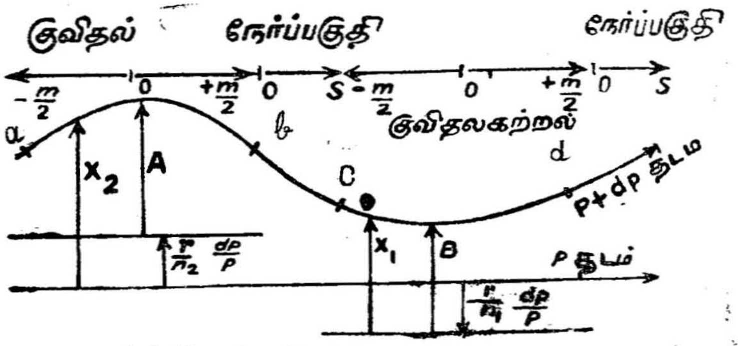
$$\frac{dx^2}{dL^2} + \frac{n_2}{r^2}\, x_2 = \frac{1}{r}\frac{dp}{p} \qquad (9.56)$$

இவ்விரு சமன்பாடுகளுக்கும் உரிய எளிய தீர்வுகள், முறையே

$$x_1 = -\frac{r}{n_1}\frac{dp}{p} \qquad (9.57)$$

$$x_2 = \frac{r}{n_2}\frac{dp}{p} \qquad (9.58)$$

ஆகும். x_1-ன் எதிர்க்குறி மதிப்பானது, அது நடுநிலைத் தடத்திலிருந்து உள்நோக்கி இருப்பதைக் குறிக்கின்றது.



படம் 9.17 வன்குவிப்புப் பொறியில் தடத்தின் பகுதிகள்

படம் 9.17 ஆனது வன்குவிப்புப் பொறியில் துகள்தடத்தின் ($p+dp$-தடம்) அமைப்பைக் காட்டுகின்றது. படத்தில் ஆரத்திசையில் குவிதலகற்றும் காந்தப் பகுதியில் துகளின் தடம் *Cosh*-அலையின் தன்மை பெற்று, p-தடத்திலிருந்து x_1 தூரம் உள்ளே அமைந்துள்ளது (cd). ஆரத்திசையில் குவிக்கும் காந்தப்பகுதியில் துகளின் தடம் *Cos*-அலையின் தன்மை பெற்று p-தடத்திலிருந்து x_2 தூரம் வெளியே அமைந்துள்ளது (ab). இவ்விரு காந்தப் பகுதிகளுக்குமிடையில் நேர்ப்பகுதி இருக்குமானால், ab -யும் cd -யும் bc என்னும் நேர் கோட்டுப் பாதையால் இணைக்கப்பெறும். நாம் முன்னர் பெற்ற தீர்வுகள் இரண்டும் (9.57 & 9.58) bc-என்னும் நேர்க்கோட்டுப் பாதை இல்லாத நிலைக்கு உரியன. ஆனால் bc-யையும் கருத்தில் கொண்டு தீர்வு கண்டோமானால்,

$$x_1 = -\frac{r}{n_1}\frac{dp}{p} + B\,Cosh\,\frac{n_1^{\frac{1}{2}}\,L}{r} \qquad (9.59)$$

$$x_2 = +\frac{r}{n_2}\frac{dp}{p} + A\,Cos\,\frac{n_2^{\frac{1}{2}}\,L}{r} \qquad (9.60)$$

ஆகும்; A, B என்பன மாறிலிகள். காந்தப் பகுதியுள் நீளங்களை அளக்கும் போது காந்தப் பகுதியின் மையத்தைச் சுழியமாகவும், நேர்ப்பகுதியுள் தூரங்களை அளக்கும்போது, அதன் இடப்பக்க

முனையைச் சுழியமாகவும் கொள்ளவேண்டும். குவிக்கும் காந்தப் பகுதியை M_1 எனவும், அதை அடுத்த நேர்ப்பகுதியை s_1 எனவும், குவிதலகற்றும் காந்தப் பகுதியை M_2 எனவும் கொள்வோம்.

இனி சமன் 9·59, 9.60 -ல் உள்ள A, B என்ற மாறிலிகளின் மதிப்புகளைப் பின்வருமாறு கணக்கிடலாம். s_1 -ல் காந்தப்புலம் இல்லாத காரணத்தால், துகளானது M_1 -லிருந்து s_1 -ல் நுழையும் தருணத்தில் பெற்ற சரிவையே M_2-வை அணுகும் வரையும் பெற்றிருக்கும். அதாவது, M_1 -ன் வலப்பக்க முனையிலுள்ள சரிவும், M_2 -ன் இடப்பக்க முனையிலுள்ள சரிவும் சமமாகும்.

M_2 வில் ஏற்படும் இடப்பெயர்ச்சி,

$$x_1 = -\frac{r}{n_1}\frac{dp}{p} + B\ Cosh\left(\frac{n_1^{\frac{1}{2}} L}{r}\right)$$

எனவே, காந்தப்பகுதியின் நீளம் 'm', நேர்ப்பகுதியின் நீளம் s எனில், காந்தம் M_2 -ன் இடப்பக்க முனையில் $(L = -m/2)$ சரிவிற்கான தொடர்பை,

$$\frac{dx_1}{dL} = x_1' = \frac{Bn_1^{\frac{1}{2}}}{r}\ Sinh\left(\frac{-n_1^{\frac{1}{2}} m}{2r}\right)$$

அல்லது, $$x_1' = -\frac{Bn_1^{\frac{1}{2}}}{r}\ Sinh\left(\frac{n_1^{\frac{1}{2}} m}{2r}\right) \qquad (9.61)$$

என எழுதலாம்.

மேலும், $$\frac{n_1^{\frac{1}{2}} m}{r} = \theta_1$$

எனக் குறிப்போமானால்,

$$x'_1 = -\frac{Bn_1^{\frac{1}{2}}}{r}\ Sinh\frac{\theta_1}{2} \qquad (9.62)$$

மேலும், $$x_2 = \frac{r}{n_2}\frac{dp}{p} + A\ Cos\frac{n_2^{\frac{1}{2}} L}{r}$$

இவ்வாறே $\frac{n_2^{\frac{1}{2}} m}{r} = \theta_2$ எனில், M_1- ன் வலப்பக்க முனையில் $\left(L = \frac{m}{2}\right)$

சரிவிற்கான தொடர்பை, $$x_2' = -\frac{An_2^{\frac{1}{2}}}{r} Sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \qquad (9.63)$$

என எழுதலாம். இரு சரிவுகளும் சமமாதலால்,

$$x'_2 = x'_1$$

அதாவது,
$$\frac{An_2^{\frac{1}{2}}}{r} Sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) = \frac{Bn_1^{\frac{1}{2}}}{r} Sinh\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \qquad (9.64)$$

இனி, M_2 - ன் இடப்பக்க முனைவரை துகள் அடைந்த இடப் பெயர்ச்சியைக் கருதுவோம். இந்த இடப் பெயர்ச்சியானது s_1 ன் வலப்பக்க முனைவரை துகள் அடைந்த இடப்பெயர்ச்சிக்குச் சமம். அதாவது, s_1 - ன் வலப்பக்க முனைவரை துகள் அடைந்த பெயர்ச்சி $= M_1$ன் வலப்பக்கமுனை வரையுள்ள இடப்பெயர்ச்சி $+$ s_1ன் நீளம் $\times \left(\frac{dx_2}{dL}\right)$

$$\therefore (x_1)_{L=-m/2} = x_2 + s\left(\frac{dx_2}{dL}\right)_{L=m/2}$$

$$\therefore -\frac{r}{n_1}\frac{dp}{p} + B\, Cosh\left(\frac{\theta_1}{2}\right) = \frac{r}{n_2}\frac{dp}{p} + A\, Cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) - \frac{sn_2^{\frac{1}{2}}}{r} A\, Sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \qquad (9.65)$$

சமன்கள் 9.64, 9.65 லிருந்து,

$$-\frac{r}{n_1}\frac{dp}{P} + A\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Sin\theta_2/2}{Sinh\theta_1/2}\right) Cosh\left(\frac{\theta_1}{2}\right) = \frac{r}{n_2}\frac{dp}{p} + A\, Cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) - \frac{sn_2^{\frac{1}{2}}}{r} A\, Sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)$$

$$\therefore A\left\{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{Sin\,\theta_2/2}{Sinh\,\theta_1/2} Cosh\left(\frac{\theta_1}{2}\right) - Cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + \frac{s\,n_2^{\frac{1}{2}}}{r} Sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)\right\} = r\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)\frac{dp}{p}$$

$$\therefore A\left\{n_2^{\frac{1}{2}}\, Sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) Cosh\left(\frac{\theta_1}{2}\right) - n_1^{\frac{1}{2}}\, Cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) Sinh\frac{\theta_1}{2}\right.$$

$$\left. + \frac{sn_2^{\frac{1}{2}}\, n_1^{\frac{1}{2}}}{r} Sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) Sinh\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\right\} = \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) r n_1^{\frac{1}{2}}\, Sinh\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\frac{dp}{p} \qquad (9.66)$$

சமன் 9.66ல்

$$n_2^{\frac{1}{2}} Sin\ \frac{\theta_2}{2}\ Cosh\ \frac{\theta_1}{2} - n_1^{\frac{1}{2}}\ Cos\ \frac{\theta_2}{2}\ Sinh\ \frac{\theta_2}{2}$$

$$+ \frac{sn_2^{\frac{1}{2}}\ n_1^{\frac{1}{2}}}{r}\ Sin\ \frac{\theta_2}{2} Sinh\ \frac{\theta_1}{2} = G \qquad (9.67)$$

எனக் கொண்டால்,

$$AG = \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) r n_1^{\frac{1}{2}}\ Sinh \frac{\theta_1}{2} \cdot \frac{dp}{p}$$

$$\therefore A = \frac{r}{G}\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) n_1^{\frac{1}{2}}\ Sinh\ \frac{\theta_1}{2} \cdot \frac{dp}{p} \qquad (9.68)$$

எனவே,

$$B = \frac{r}{G}\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) n_2^{\frac{1}{2}}\ Sin\ \frac{\theta_2}{2} \cdot \frac{dp}{p} \qquad (9.69)$$

ஆகும்.

சமன்கள் 9.68, 9.69 ஆகியவை A, B என்ற மாறிலிகளின் மதிப்பைத் தருகின்றன.

'p' உந்தமுடைய இசைவுறு துகளியங்கும் பாதையின் மொத்த நீளம் = வளைவுப் பாதைகளின் மொத்த நீளம் + நேர் பகுதிகளின் மொத்த நீளம் ஆகும்.

p உந்தத் துகளின், வளைவுத் தடத்தில் ஒரு சிறுபகுதியின் நீளம் $rd\theta$ என்றும், நேர்ப்பகுதியொன்றின் நீளம் s என்றும், இசைவுறு துகளின் பாதையில் $2N$ காந்தங்களும் $2N$ நேர்ப்பகுதிகளும் உள்ளன, என்றும் கொள்வோமானால், இசைவுறு துகள் இயங்கும் பாதையின் மொத்த நீளம்,

$$L_p = \int_0^{2\pi} r d\theta + 2Ns \qquad (9.70)$$

இவ்வாறே $(p+dp)$ உந்தமுடைய இசைவுறுத்துகள் இயங்கும் பாதையின் மொத்த நீளம்

$$L_{p+dp} = \int_0^{2\pi} (r+x)\ d\theta + 2Ns \qquad (9.71)$$

எனவே, இரண்டு பாதைகளுக்கும் இடையிலுள்ள வேறுபாடு,

$$L_{p+dp} - L_p = dL = \int x \; d\theta \qquad (9.72)$$

$$\therefore \frac{dL}{L_p} = \frac{\int x d\theta}{\int r d\theta + 2Ns}$$

அதாவது,
$$\frac{dL}{L_p} = \frac{\frac{r}{N}\int x \; d\theta}{\frac{r}{N}(2\pi r + 2Ns)}$$

$$= \frac{1}{r}\left\{\frac{\frac{r}{N}\int x \; d\theta}{\frac{2\pi r + 2Ns}{N}}\right\} \qquad (9.73)$$

சமன் 9.73-ல் $\frac{2\pi r + 2Ns}{N}$ என்ற கூறு, ஒரு தொகுப்பின் நீளத்தைக் குறிப்பதாகும்.

மேலும், $\left\{\frac{\frac{r}{N}\int x \; d\theta}{\frac{2\pi r + 2Ns}{N}}\right\}$ ஆனது

காந்த இணை ஒன்றில், x -ன் சராசரி மதிப்பை $(\bar{x})$ க் குறிப்பதாகும். அதாவது,

$$\bar{x} = \left\{\frac{\frac{r}{N}\int x \; d\theta}{\frac{2\pi r + 2Ns}{N}}\right\} \qquad (9.74)$$

$$\therefore \frac{dL}{L_p} = \frac{\bar{x}}{r} \qquad (9.75)$$

குவிக்கின்ற காந்தம், அதையடுத்த நேர்ப்பகுதியொன்று மற்றும், குவிதலகற்றுகின்ற காந்தம், அதையடுத்த நேர்ப்பகுதி ஆகியவை ஒரு தொகுப்பை அமைக்குமானால், அதன் மொத்த நீளம் $2(m+s)$ ஆகும். இத்தகைய தொகுப்பிற்கான $\bar{x}/r$ -ன் மதிப்பைக் கணக்கிடுவோம்.

இங்கு $$\frac{\bar{x}}{r} = \frac{1}{2(m+s)r}\left\{\int_{-m/2}^{m/2} x_2\, dL + \int_{-m/2}^{m/2} x_1\, dL\right\}$$

$$= \frac{1}{2(m+s)r}\left\{\int_{-m/2}^{m/2}\left(\frac{r}{n_2}\frac{dp}{p} + A\ Cos\ \frac{n_2^{\frac{1}{2}}\ L}{r}\right)dL\right.$$

$$\left. + \int_{-m/2}^{m/2}\left(-\frac{r}{n_1}\frac{dp}{p} + B\ Cosh\frac{n_1^{\frac{1}{2}}\ L}{r}\right)dL\right\}$$

$$\therefore \frac{\bar{x}}{r} = \frac{1}{2(m+s)r}\left\{\frac{r}{n_2}\frac{dp}{p}(L)_{-m/2}^{m/2} + A\left(\frac{r\ Sin\,(n_2^{\frac{1}{2}}L/r)}{n_2^{\frac{1}{2}}}\right)_{-m/2}^{m/2}\right.$$

$$\left. - \frac{r}{n_1}\ \frac{dp}{p}(L)_{-m/2}^{m/2} + B\left(\frac{r\ Sinh\ (n_1^{\frac{1}{2}}\ L/r)}{n_1^{\frac{1}{2}}}\right)_{-m/2}^{m/2}\right\}$$

$$= \frac{1}{2(m+s)r}\left\{\frac{r}{n_2}m\frac{dp}{p} + \frac{A\,r}{n_2^{\frac{1}{2}}}2.\ Sin\ \frac{n_2^{\frac{1}{2}}m}{2r} - \frac{r}{n_1}m\frac{dp}{p} + \right.$$

$$\left. \frac{Br}{n_1^{\frac{1}{2}}}2.\ Sinh\frac{n_1^{\frac{1}{2}}m}{2r}\right\}$$

$$= \left\{\frac{m}{2(m+s)n_2}\frac{dp}{p} + \frac{A}{(m+s)n_2^{\frac{1}{2}}}Sin\ \frac{n_2^{\frac{1}{2}}m}{2r} - \frac{m}{2(m+s)n_1}\frac{dp}{p}\right.$$

$$\left. + \frac{B}{(m+s)n_1^{\frac{1}{2}}}\ Sinh\frac{n_1^{\frac{1}{2}}m}{2r}\right\}$$

$$\therefore \frac{\bar{x}}{r} = \left\{ \frac{m}{2(m+s)\,n_2} \frac{dp}{p} + \frac{A}{(m+s)n_2^{\frac{1}{2}}} \,Sin\, \frac{\theta_2}{2} - \right.$$

$$\left. \frac{m}{2(m+s)\,n_1} \frac{dp}{p} + \frac{B}{(m+s)n_1^{\frac{1}{2}}} \,Sinh\, \frac{\theta_1}{2} \right\} \qquad (9.76)$$

A, B என்னும் மாறிலிகளின் மதிப்பை சமன்பாடுகள் 9.68, 9.69 -லிருந்து பதிலீடு செய்ய,

$$\frac{\bar{x}}{r} = \left\{ \frac{m}{2(m+s)\,n_2} \frac{dp}{p} + \frac{r}{G}\frac{dp}{p}\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \right.$$

$$\frac{n_1^{\frac{1}{2}}\ Sinh\ \theta_1/2.\ Sin\ \theta_2/2}{n_2^{\frac{1}{2}}\ \ (m+s)} - \frac{m}{2(m+s)\,n_1}\frac{dp}{p} +$$

$$\left. \frac{r}{G}\frac{dp}{p}\ \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)\frac{n_2^{\frac{1}{2}}}{n_2^{\frac{1}{2}}}\ \frac{Sin\ \theta_2/2\ \ Siuh\ \ \theta_1/2}{(m+s)} \right\}$$

$$= \frac{m}{2(m+s)}\left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}\right)\frac{dp}{p} + \frac{dp}{p}\ \left\{\frac{r}{(m+s)}\ \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)\right\}$$

$$\left\{\frac{Sinh\ \theta_1/2\ .\ Sin\ \theta_2/2}{G}\right\}\quad \left\{\frac{n_1^{\frac{1}{2}}}{n_2^{\frac{1}{2}}} + \frac{n_2^{\frac{1}{2}}}{n_1^{\frac{1}{2}}}\right\}$$

$$= \frac{m}{2(m+s)}\left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}\right)\frac{dp}{p} + \frac{dp}{p}\quad \left\{\frac{Nm}{\pi\,(m+s)}\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)\right\}$$

$$\left\{\frac{Sinh\ \theta_1/2\ .\ Sin\ \theta_2/2}{G}\right\}\quad \left\{\frac{n_1^{\frac{1}{2}}}{n_2^{\frac{1}{2}}} + \frac{n_2^{\frac{1}{2}}}{n_1^{\frac{1}{2}}}\right\}$$

அடுத்து சமன் 9.67-ஆல் பெறப்படும் G-யின் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்வோமாயின்,

$$\frac{\bar{x}}{r} = \frac{m}{2(m+s)}\left(\frac{1}{n_2}-\frac{1}{n_1}\right)\frac{dp}{p}$$

$$+ \left\{\frac{dp}{p}\ \frac{\aleph m}{\pi\ (m+s)}\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)\right\}$$

$$\left\{\frac{n_1^{\frac{1}{2}}}{n_2^{\frac{1}{2}}} + \frac{n_2^{\frac{1}{2}}}{n_1^{\frac{1}{2}}}\right\}\left\{\frac{Sinh\ \theta_1/2\ .\ Sin\ \theta_2/2}{n_2^{\frac{1}{2}} Sin\ \theta_2/2\ .\ Cosh\ \theta_1/2\ -\ n_1^{\frac{1}{2}} Cos\ \theta_2/2\ .\ Sinh\ \theta_1/2 + s/r\ n_1^{\frac{1}{2}}\ n_2^{\frac{1}{2}} Sin\ \theta_2/2\ .\ Sinh\ \theta_1/2}\right\}$$

$$\therefore \frac{\bar{x}}{r} = \frac{m}{2\ (m+s)}\left(\frac{1}{n_2}-\frac{1}{n_1}\right)\frac{dp}{p}$$

$$+ \left\{\frac{dp}{p}\ \frac{\aleph m}{\pi\ (m+s)}\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)\left(\frac{n_1^{\frac{1}{2}}}{n_2^{\frac{1}{2}}} + \frac{n_2^{\frac{1}{2}}}{n_1^{\frac{1}{2}}}\right)\right\}$$

$$\left\{\frac{1}{n_2^{\frac{1}{2}} Coth\ \theta_1/2 - n_1^{\frac{1}{2}} Cot\ \theta_2/2 + \frac{s\pi n_1^{\frac{1}{2}}\ n_2^{\frac{1}{2}}}{m\aleph}}\right\} \quad (9.77)$$

p உந்தமுடைய துகள் L நீளமுள்ள பாதையிலும் $(p+dp)$ உந்தமுடைய துகள் $(L+dL)$ நீளமுள்ள பாதையிலும் இயங்கும்போது, உந்த இறுக்கம், $a = \dfrac{dp/p}{dL/L}$ எனக் (சமன் 2.58) கண்டோம்.

ஆனால், $\dfrac{dL}{L} = \dfrac{\bar{x}}{r}$ (சமன் 9.75)

ஆதலால், $$\frac{1}{a} = \frac{\bar{x}/r}{dp/p} \quad (9.78)$$

$$\therefore \frac{1}{a} = \frac{m}{2(m+s)}\left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}\right) + \frac{\aleph m}{\pi\ (m+s)}\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)$$

$$\left(\frac{n_1^{\frac{1}{2}}}{n_2^{\frac{1}{2}}} + \frac{n_2^{\frac{1}{2}}}{n_1^{\frac{1}{2}}}\right)\left\{\frac{1}{n_2^{\frac{1}{2}}\ Coth\ \theta_1/2 - n_1^{\frac{1}{2}} Cot\ \theta_2/2 + \frac{s\ \pi n_1^{\frac{1}{2}}\ n_2^{\frac{1}{2}}}{m\aleph}}\right\}$$

புல எண்கள் $n_1 = n_2 = n$ எனில்,

$$\frac{1}{a} = \frac{\aleph m}{2(m+s)}\left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n}\right) + \frac{\aleph m}{\pi(m+s)}\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n}\right)\left(\frac{n^{\frac{1}{2}}}{n^{\frac{1}{2}}} + \frac{n^{\frac{1}{2}}}{n^{\frac{1}{2}}}\right)$$

$$\left\{\frac{1}{n^{\frac{1}{2}}\,Coth\,\theta_1/2 - n^{\frac{1}{2}}\,Cot\,\theta_2/2 + \frac{s\pi\, n^{\frac{1}{2}} n^{\frac{1}{2}}}{m\aleph}}\right\}$$

அல்லது,

$$\frac{1}{a} = \frac{\aleph m}{\pi(m+s)}\left(\frac{4}{n}\right)\left\{\frac{1}{n^{\frac{1}{2}}\left(Coth\;\theta_1/2 - Cot\;\theta_2/2 + \frac{s\pi n^{\frac{1}{2}}}{m\aleph}\right)}\right\}$$

அல்லது,

$$a = \frac{\pi\, n^{\frac{3}{2}}}{4\aleph}\left(1 + \frac{s}{m}\right)\left\{Coth\,\theta_1/2 - Cot\,\theta_2/2 + \frac{s\,\pi n^{\frac{1}{2}}}{m\aleph}\right\}$$

அதாவது, உந்த இறுக்கம்,

$$a = \frac{\pi\, n^{\frac{3}{2}}}{4\aleph}\left(1 + \frac{s}{m}\right)\left\{Coth\,\frac{n^{\frac{1}{2}}\pi}{2\aleph} - Cot\,\frac{n^{\frac{1}{2}}\pi}{2\aleph} + \frac{s\,\pi\, n^{\frac{1}{2}}}{m\aleph}\right\} \tag{9.79}$$

இந்த a வானது பந்தயப் பாதை சிங்க்ரோட்ரானுக்குரியதாகும்.

சமன் 9.79 -லிருந்து a -ன் மதிப்பு ஒன்றைவிடப் பெரியதாகவே ($a > 1$) அமையும் என்றறியலாம். எனவே, நாம் முன்னர் கண்ட உந்த இறுக்கப் பண்பிலிருந்து, வெவ்வேறு உந்த மதிப்புகளுடைய தடங்கள் ஆரத்திசையில் குறுகிய பரப்பில் இறுக்கப்பட்டிருக்கும் என்பது புலப்படும்.

இசைவுறு துகளின் உந்தம் p எனவும், நேரம் τ எனவும் கொள்வோம். இசைவுறுத்துகளின் உந்தம் dp அளவு வேறுபட்டும், நேரம் $d\tau$ அளவு வேறுபட்டுமிருப்பதாகக் கருதுவோம். துகளின் ஓய்வு ஆற்றல் E_0 எனவும், இயக்க ஆற்றல் T எனவும் கொள்வோமானால்,

$$\frac{d\tau}{\tau} = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{\gamma^2}\right)\frac{dp}{p}$$

எனவும் (சமன் 2.75) கண்டோம்.

இனி, இயக்க ஆற்றல் சுழியத்திலிருந்து அதிகரிக்கத் தொடங்கு மாதலால் γ வின் சிறும மதிப்பு 1 $[\gamma = (T+E_0)/E_0$ -ல், $T=0]$ ஆகும். எனவே $1/\gamma^2$ -ன் தொடக்க மதிப்பும் 1 ஆகும். இயக்க ஆற்றல் உயர உயர, γ -வின் மதிப்பும் பெருகும். ஆகவே, $1/\gamma^2$ -ன் மதிப்பு குறையத் தொடங்கும். தவிர, வன்குவிப்புப் பொறிகளில் $a > 1$ என்று கண்டோம். இதனால் $1/a < 1$. மிகக் குறைந்த ஆற்றல் எல்லைகளில் $\gamma^2 > a$. அதாவது, $1/\gamma^2 > 1/a$ ஆகும். எனவே, $(1/a - 1/\gamma^2)$ எதிர்க்குறி பெறும்.

குறிப்பிட்டதொரு ஆற்றலில் $\gamma^2 = a$ எனில், $(1/a - 1/\gamma^2)$ சுழியமாகும். இந்த ஆற்றலுக்குத் திரிவுநிலை ஆற்றல் *(Transition Energy)* என்று பெயர். துகள் உயர்ந்த ஆற்றல் எல்லைகளை அடையும் போது $\gamma^2 > a$ ஆகும். எனவே, $(1/a - 1/\gamma^2)$ நேர்க்குறி பெறும்.

மேற்கண்ட மூன்றுவித நிலைகளில் இருந்தும் பின்வரும் முக்கிய மானதொரு முடிவைப் பெறலாம். திரிவுநிலை ஆற்றலுக்குக் கீழே உந்தத்தில் ஏற்படும் அதிகரிப்பு, சுற்றுநேரத்தைக் *(Period of Revolution)* குறைக்கும். எனவே, குறைந்த ஆற்றல் எல்லைகளில் நேரியல் பொறிகள் போல், இருவாட்டந்தரு பொறிகள் செயல் படவேண்டும். அதாவது, முடுக்கந்தரு மின்புலம் உயரத் தொடங் கும் கணத்தில் துகள்கள் அதை நாட வேண்டும். அப்பொழுதுதான் கலைக்கோண நிலைப்பாடு நிலவும் (படம் 2.9). திரிவுநிலை ஆற்றலுக்கும் மேற்பட்ட ஆற்றல்களில் துகளின் உந்தத்தில் எற்படும் அதிகரிப் பால் சுற்றுநேரமும் அதிகரிக்கும். எனவே, அதிக ஆற்றல் எல்லைகளில் மாறு வாட்டமுடைய பொறிகளில் உள்ளதைப்போல் இரு வாட்டந்தரு பொறிகளில் துகளின் இயக்கம் அமைய வேண்டும். அதாவது, மின்புலம் காலத்தை ஒட்டி விழும்போது துகள்கள் அதை நாடவேண்டும். அதாவது, இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான் ஆனது உயர்ந்த ஆற்றல் எல்லைகளில் சிங்க்ரோட்ரானைப் போல் செயல்படுகின்றது (படம் 2.11).

ஆனால், திரிவுநிலை ஆற்றலில் இயங்கும் துகளின் உந்தத்தில் ஏற்படும் மாற்றம் சுற்று நேரத்தில் மாறுதல்களை ஏற்படுத்தாது. துகள் திரிவுநிலை ஆற்றலை அணுகும்போது கலைக்கோண நிலைப்பாடு குலையும்; திரிவுநிலை ஆற்றலை அடைந்தவுடன் மறைந்து விடும். துகள்களின் ஆற்றல் மேலும் பெருகியவுடன் கலைக்கோண நிலைப்பாடு மீண்டும் வலிமைபெறத் தொடங்கும். எனவே, திரிவுநிலை ஆற்றலைத் துகள் அணுகும்போது மின்புலத்தின் கலைக்கோணத்தைத் தேவையான அளவு பெயர்ச்சி *(Shift)* அடையுமாறு செய்து கலைக்கோண நிலைப்பாடு குலையாமல் தடுக்கலாம். அல்லது, வன் குவிப்புப் பொறிகளில் உட்செலுத்தப்படும் துகள்களின் ஆற்றல்

அட்டவணை 9.1

இரு வாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரானின் இயல்புகள்

அளபுரு	அலகு	*CERN*	புருக்ஹேவன்	ஒகிரிட்ஜ் (*Oakridge*)	லெனின்கிராடு
புல எண்	—	288·4	357	270	410
சராசரி ஆரம்	மீட்டர்	100	128·5	65	167
காந்தப் பகுதிகள்	—	100	240	32	120
காந்தப் பாயம் (தொடக்கத்தில்)	வெபர்/மீட்டர்^{2}	0·0147	0·0121	0·12	0·009
பெரும காந்தப் பாயம்	வெபர்/மீட்டர்^{2}	1·4	1·3	1·0	1·2
இரும்பின் எடை	டன்கள்	3,600	4,000	1,200	24,000
துகள் செலுத்தி (*Injector*)	—	நேரியல் முடுக்கி	நேரியல் முடுக்கி	சைக்ளோட்ரான்	நேரியல் முடுக்கி
முடுக்கும் ஒத்ததிர்விகள் (*Resonators*)	—	16	12	16	—
ஒரு சுற்றில் ஈட்டப்படும் சராசரி ஆற்றல்	*keV*	54	80	3,000	100
பெரும ஆற்றல்	*BeV*	28	30	12	50
வெளிவரும் துகள்கள்/துடிப்பு	$\times 10^{10}$	20	1	200	—

திரிவுநிலை ஆற்றலை விட அதிகமாக இருக்குமாறு செய்வதன் மூலமும் இந்த இடர்ப்பாட்டைத் தவிர்க்கலாம்.

9.10. குறிப்பிடத்தக்க சில இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான்கள்:

முதன் முதலாகக் கார்னெல் (*Cornell*) பல்கலைக் கழகத்தில் இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான் அமைக்கப்பட்டது. இதன் ஆற்றல் 15 *BeV* ஆகும். இந்தப் பொறியிலுள்ள காந்தத்தின் எடை 20 டன்களாகும். இப் பொறியில் 16 தொகுப்புகள் உள்ளன. புல எண்களின் மதிப்பு $+14 \cdot 15$-ம், $-16 \cdot 25$-ம் ஆகும். வாண்டிகிராஃப் இயற்றியிலிருந்து கிடைக்கப்பெறும் 2 *MeV* ஆற்றலுடைய துகள்கள் இந்தப் பொறியினுள் முடுக்கப்படுகின்றன. துகளியங்குகின்ற வட்ட வடிவச் சுற்றுப் பாதையின் ஆரம் 3·82 மீட்டர் ஆகும். வெற்றிட அறையின் அகலம் $7 \cdot 62 \times 10^{-2}$ மீட்டர், உயரம் $2 \cdot 54 \times 10^{-2}$மீ. இப் பொறியில் திரிவுநிலை ஆற்றலைவிட அதிக ஆற்றலுடைய அயனிகள் உட்செலுத்தப்படுவதால் கலைக்கோண நிலைப்பாடு குலைவதில்லை.

1959-ல் *CERN*-ல் உருவாக்கப்பட்ட இருவாட்டந்தரு புரோட்டான் சிங்க்ரோட்ரான் 24 *BeV* ஆற்றலுக்குத் துகள்களை முடுக்க வல்லது. இப் பொறியின் ஆரம் 100 மீட்டராகும். 4·3 மீட்டர் நீளமுள்ள 100 காந்தத் துண்டுகளும், 1·6 மீட்டர் நீளமுள்ள 80 நேர்ப் பகுதிகளும், 3 மீட்டர் நீளமுள்ள 20 நேர்ப்பகுதிகளும் உடையது இந்தப் பொறி.

9.3-ல் விவரிக்கப்பட்ட புருக்ஹேவன் வன்குவிப்புச் சிங்க்ரோட்ரான் 30 *BeV* ஆற்றல் தரவல்லது. அளவிலும், தரும் ஆற்றல் காரணமாகவும், இப் பொறி சிறந்து விளங்குகின்றது.

9.11. வன்குவிப்பும் காந்த வில்லைகளும் (Strong Focussing and Magnetic Lenses)

வன்குவிப்புத் தத்துவம் நடைமுறைக்கு வந்தவுடன், காந்த வில்லைகளை அமைப்பதில் புது முயற்சிகள் தோன்றின. இந்த நால்துருவ வில்லைகளின் அமைப்பையும், முடுக்கும் பொறிகளின் வார்ச்சியில் அவை எந்த அளவிற்குச் செயல்படுகின்றன என்பதையும், இனி விரிவாகக் காணலாம்.

காட்டாக, துகள்கள் Z ஆயத்திசையில் இயங்குவதாகக் கருது வோம். இந்தத் துகள்கள் இயங்கும் திசைக்குக் குறுக்காகக் (*Transverse*) காந்தப்புலம் செயல்படுமெனில், X ஆயத்திசையில்

குவிதலும், *Y* ஆயத் திசையில் குவிதலகற்றலும் தோன்றும் என அறிவோம். இக் காந்தப் பகுதியிலிருந்து மீண்டுவரும் துகள் *Y* ஆயத்திசையில் குவிக்கின்ற பிறிதொரு காந்தப்புலத்தைச் சந்திக்கும் என்ருல், வன்குவிப்பு உருவாகும் எனவும் அறிவோம்.

இத்தகு வன்குவிப்பை உருவாக்க வல்ல நால்துருவ வில்லேயானது இரு அதிபரவளேய உருளேகளுக்கு (*Hyperbolic Cylinder*) நிலேயான காந்த அழுத்தம் (*Magnetic Potential*) $+V_0$, $-V_0$- ஐத் தருவதன்மூலம் உருவாக்கப்படுகின்றது. இவ்விதம் உருவாகும் வில்லேயில் அடுத்தடுத்து உள்ள பரப்புகள் எதிர்எதிரான துருவங்களாகவும், எதிர் எதிராக உள்ள பரப்புகள் ஒரே தன்மை உடைய துருவங்களாகவும் அமையும். இவ்விதம் உருவான நால்துருவ வில்லேயைப் படம் 9.8-ல் காணலாம்.

துகளானது காந்தப்பகுதி ஒன்றில் இயங்கிப், பின் புலஆதிக்க மற்ற பகுதி S ஐயும் கடந்த பின்னுல், துகளின் நிலேயைச் சமன் 9.22 குறிக்கின்றது என்றறிவோம். இதில் $\omega z=\theta$ எனக் குறிப்போம் எனில்,

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cos\theta & 1/\omega Sin\theta \\ -\omega Sin\theta & Cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} \tag{9.80}$$

என்றமையும்.

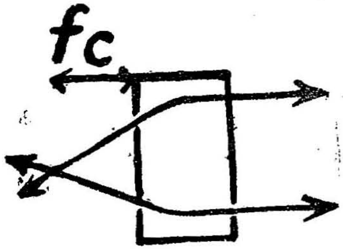
$$\begin{pmatrix} x_1^1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cos\theta - s\omega Sin\theta & 1/\omega Sin\theta + Cos\theta \\ -\omega Sin\theta & Cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} \tag{9.81}$$

எனவே, இடப்பெயர்ச்சி $x_1=(Cos\theta - s\omega Sin\theta)+x'(1/\omega Sin\theta + sCos\theta)$ (9.82)

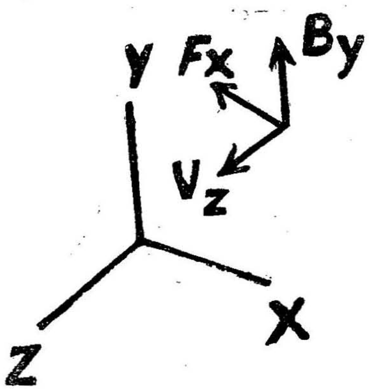
சரிவு, $x'_1=-x\ \omega Sin\theta + x'Cos\theta$ (9.83)

என்ருகும்.

உள்ளிடு கற்றை (*Input Beam*) அச்சுக்கு இணேயாகச் செயல்படுகின்றது. இந்தத் துகள்கற்றை அச்சிலிருந்து அடைந்த இடப்பெயர்ச்சி x ஆகும். சரிவு $x'=0$ ஆகும். துகள்கற்றை காந்தப் பகுதியைக் கடந்து, புலஆதிக்கமற்ற பகுதியையும் தாண்டியபின், அச்சைச் சந்திக்கின்ற புள்ளியிலிருந்து வில்லேயின் முகம் வரை உள்ள தூரமே குவியத் தூரமாக (f_c) அளக்கப்படுகின்றது. படம் (9.18). முக்கியக் குவியத்தில் இடப்பெயர்ச்சி x_1 சுழியமாகும்; சரிவு x_1' ஆகும். $s=f_c$ எனக்குறிக்க, சமன்கள் 9.82, 9.83-லிருந்து,



படம் 9.18
குவித்திடு வில்லை



படம் 9.19
குவித்திடு வில்லையின் அளபுருபுகள்

$$0 = x(Cos\theta - f_c\omega Sin\theta) \qquad (9.84)$$

$$x_1' = -x\omega Sin\theta \qquad (9.85)$$

சமன் 9.84 - லிருந்து $f_c = \frac{1}{\omega} Cot\theta$

என்று பெறலாம்.

அதாவது, $f_c = \frac{1}{\omega} Cot\omega z$

ஆகும். $z = L$ எனில், $f_c = \frac{1}{\omega} Cot\omega L$.

மேலும் $\omega^2 = \frac{qk}{M}$

என்றறிவோம். எனவே, $\omega^2 = \frac{k}{Br}$

ஆகும். இதில் $k = \frac{dB_x}{dy} = \frac{dB_y}{dx}$ ஆகும்.

$$\therefore \quad \omega^2 = \frac{1}{Br} \frac{dB_y}{dx}$$

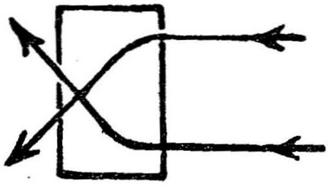
$$\omega = \left(\frac{dB_y/dx}{Br}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (9.86)$$

ஆகும். இதனால்,

$$f_c = \left(\frac{Br}{B_y/dx}\right)^{\frac{1}{2}} Cot \left\{\left(\frac{dB_y/dx}{Br}\right)^{\frac{1}{2}} L \right\} \qquad (9.87)$$

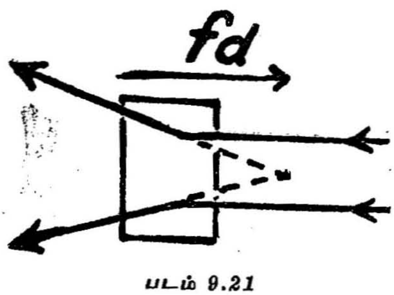
என்றாகும். சமன் 9.87-ல் உள்ள 1/ω விற்கான கூறைக் கருதுவோம்.

இந்தக் கூறில் காந்த வாட்டத்தைக் குறிக்கின்ற கூறு dB_y/dx ஆகும். எனவே, வலுவான காந்தவாட்டம் செயல்படுமானல் குவியத் தூரம் f_c சிறுத்து விடும் என்பதை அறியலாம். மேலும் $Br = Mv/q$ ஆதலால், அதிக அளவு உந்தமுடைய துகளினல் குவியத்தூரம் அதிகமாகும் என்றும் அறியலாம். இனி $Cot\theta$ கூறைக் கருதுவோம். துகள் குறைந்த உந்தம் உடையதாகவும், காந்தம் அதிக நீளம் உடையதாகவும், வலுவான வாட்டம் உடையதாகவும் அமையுமானல் குவியத்தூரம் f_c சிறுத்து விடும் என்பதை அறியலாம். எனவே, θ ன் மதிப்பிற்கேற்ப f_c மாறும் என்று உணரலாம். $\theta = \pi/2$ எனில் f_c சுழியமாகும் என்றும் அறியலாம். எனவே, $\theta = \pi/2$ ஆக அமையும் போது, அச்சுக்கு இணையாக வரும் துகள் காந்தத்தை விட்டு வெளிவந்த உடனேயே வன்மையாகக் குவிக்கப்படும். ஆனல் θ -ன் மதிப்பு $\pi/2$-வை விட அதிகமாகுமானல் குவியத்தூரம் எதிர்க்குறி உடையதாகும். இந் நிலையில் அச்சுக்கு இணையாக வரும் துகள்-கற்றை வில்லைக்குள்ளேயே அச்சைக் கடந்து, வெளிவரும்போது விரிந்து தோன்றும். இதைப் படம் 9.20-ல் தெளிவாகக் காணலாம். θ - ன் மதிப்பு மேலும் அதிகரிக்கப்பட்டு π க்கும் $3\pi/2$ க்கும் இடையில் அமையுமானல், வில்லையானது மீண்டும் குவிக்கும் பண்படையும். எனவே, θ –ன் மதிப்பிற்கேற்பக் குவித்திடும் வில்லையே விரிப்பதாகவும் குவிப்பதாகவும் செயல்படும் என்றறியலாம்.

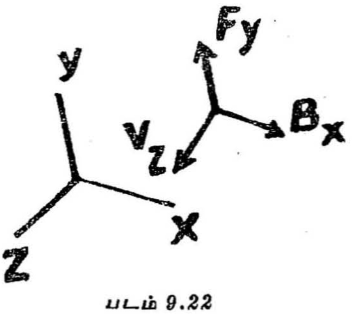


படம் 9.20
'θ'-ன் மதிப்பும் துகள் கற்றையும்

9.12. விரித்திடு வில்லையின் குவியத்தூரம்



படம் 9.21
விரித்திடு வில்லை



படம் 9.22
விரித்திடு வில்லையின் அளபுருபுகள்

இனி, விரித்திடு வில்லையொன்றின் குவியத் தூரத்தைக் கணக்கிடலாம். கிடைத்தளத்தில் காந்த நால்துருவவில்லை குவிக்கும்

பண்பைப் பெற்றிருந்தது எனக் கண்டோம். இனிச் செங்குத்துத் தளத்தைக் கருதுவோமெனில், நால்துருவவில்லை விரிக்கும் பண்பைப் பெற்றிருக்கும்.

காந்தப் புலத்தினுல் தோன்றும் விசை F_y ஆனது, படம் 9.22-ல் உள்ளவாறு செயல்படும். எனவே,

$$M \frac{d^2y}{dt^2} = F_y$$

ஆகும். எனவே, சமன் 9.20 - லிருந்து, துகள் காந்தப் பகுதியைவிட்டு வெளிவந்த உடன் பெற்றுள்ள இடப்பெயர்ச்சி y -ம், சரிவு y' -ம்

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cosh\, \omega z & 1/\omega\ Sinh\, \omega z \\ \omega\ Sinh\, \omega z & Cosh\, \omega z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}$$

என்று குறிக்கப் பெறுகின்றன. y_0 -ம் y'_0 -ம் தொடக்கத்தில் அமைந்த இடப்பெயர்ச்சியையும் சரிவையும் குறிக்கின்றன.

அச்சுக்கு இணையாக இயங்கும் இந்த அயனிகள் முதலில் வில்லையின் ஊடேயும், பின்னர் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியிலும் இயங்குவதால், புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியின் நீளம் $= s$; $\omega z = \theta$ எனில், இறுதியாக அமைந்த இடப்பெயர்ச்சியும் சரிவும்,

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cosh\theta & 1/\omega\ Sinh\theta \\ \omega\ Sinh\theta & Cosh\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}$$

என்றாகும். (9.88)

அல்லது,
$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cosh\theta + s\ \omega\ sinh\theta & 1/\omega\ Sinh\theta + s\ Cosh\theta \\ \omega\ Sinh\theta & Cosh\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \qquad (9.89)$$

உள்ளிடு கற்றையைக் கருதினுல் இடப்பெயர்ச்சி $y_0 = y_0$ எனவும், இடப்பெயர்ச்சி $y'_0 = 0$ எனவும் பெறலாம். மேலும், வில்லையின் முக்கியக்குவியத்தில் இடப்பெயர்ச்சி y சுழியமாகவும், சரிவு y' ஆகவும் அமையும். எனவே, சமன் 9.89-லிருந்து,

$$0 = y_0\, (Cosh\theta + s\omega Sinh\theta) \qquad (9.90)$$

$$y' = y_0\, (\omega\ Sinh\ \theta) \qquad (9.91)$$

படம் 9.20 ன் படி, $s = -f_d$ எனக் குறித்து, சமன் 9.90 - லிருந்து

$$f_d = -\frac{1}{\omega} Coth\, \theta$$

என்று பெறலாம். $z = L$ எனில்,

$$f_d = -\frac{1}{\omega} Coth\, \omega L \tag{9.92}$$

ஆகும். எனவே, சமன் 9.86 லிருந்து, ω-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய,

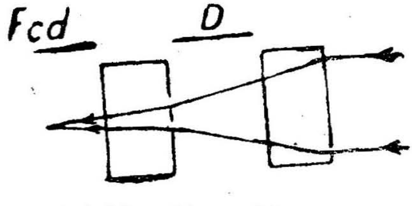
$$f_d = -\left(\frac{Br}{dB_x/dy}\right)^{\frac{1}{2}} Coth\left\{\left(\frac{dB_x/dy}{Br}\right)^{\frac{1}{2}}\right\} \tag{9.93}$$

எனப் பெறலாம். கோவை 9.93-லிருந்து f_d-க்குரிய இயல்புகளை ஆராயலாம். உந்தம் சிறியதாக உடைய துகள்களும், பெரும் வாட்டம் உடைய புலமும் அமையுமானால், f_d குறையும் என்பதை அறியலாம். இனி θ - வின் மதிப்பைப் பொறுத்து f_d எவ்விதம் மாறும் எனக் காண்போம்.

$\theta = 0$ எனில், $Coth\theta = \infty$ ஆகும். மேலும் θ அதிகரிக்கத் தொடங்குமெனில் $Cosh\theta$, ∞ – லிருந்து ஒன்றை நோக்கிக் குறையத் தொடங்கும். ஆகவே, θ வின் எந்த மதிப்பிற்கும் விரித்திடு காந்தம் (*Diverging Magnet*) குவித்திடு காந்தமாகச் செயல்படாது என்று அறியலாம்.

9.13. குவித்து விரிக்கும் இணை (Converging Diverging Pair)

இனி, இரு நால் துருவக் காந்தங்கள் இணைந்து x - திசையில் என்ன தோற்றுவிக்கும் என்பதைக் காணலாம். முதல் காந்தம் x திசையில் குவிப்பதாகவும், இரண்டாம் காந்தம் x திசையில் குவிதல் அகற்றுவதாகவும் செயல்படுவதாகக் கொள்வோம். இவ்விரு காந்தங்களும் இணைந்து செயல்படும்போது, இருவாட்டந்தரு பொறியில் உள்ள வில்லையைப் போல் அமையும் (படம் 9.23). இவ்விரு வில்லைகளின் இணையால் x திசை வன்குவிப்புத் தோன்றும். நாம் முன்னர் தருவித்த கோவை 9.81 குவித்திடு வில்லையின் ஊடேயும், பின், புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியிலும் இயங்கும் துகள் கற்றையின் இயல்பைக் குறிக்கின்றது. விரித்திடு வில்லையின் ஊடேயும், பின், புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியிலும் இயங்கும் துகள்



படம் 9.23 குவித்து - விரிக்கும் இணை

கற்றையின் இயல்பைக் கோவை 6.89-ம் குறிக்கின்றது. இனி இவ் விரு காந்தங்களும் இணைந்து செயல்படுமானால் (படம் 9.23) தோன்றும் விளைவு என்னவென்று காணலாம்.

இரு காந்தங்களுக்கும் இடைப்பட்ட தூரம் D எனக் குறிக்கலாம். இவ்விணையில் இரண்டாம் வில்லையின் இடப்பக்கப் பரப்பிலிருந்து குவியத்தூரம் அளக்கப்படுகின்றது. x - திசையில் குவிதலை ஆராயப் போகும் காரணத்தால், சமன் 9.89-ல் குத்தாயம் y-க்குப் பதிலாக x - ஐப் பயன்படுத்துவோம். குவித்து — விரிக்கும் இணையின் குவியத் தூரத்தை F_{cd} எனக் குறிக்கலாம். நாம் கருதும் இணைக்கேற்ப, சமன் 9.81-ல் உள்ள $s=D$ எனவும், 9.89-ல் உள்ள $s=F_{cd}$ எனவும் குறித்து, இவ்விணையினூடே துகளின் இயக்கத்திற்கு

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cosh\theta + F_{cd}\omega\, Sinh\theta & 1/\omega Sinh\theta + F_{cd}\, Cosh\theta \\ \omega\, Sinh\theta & Cosh\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cos\,\theta - D\omega\, Sin\theta & 1/\omega\, sin\theta + DCos\,\theta \\ -\omega Sin\theta & Cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} \qquad (9.94)$$

என்ற கோவையைப் பெறலாம். இக் கோவையிலுள்ள மேட்ரிக்ஸ் களைப் பெருக்கி x_1, x_1'க் குரிய கோவைகளைப் பெறலாம்.

$$M_{11} = \left\{ \begin{array}{l} (Cosh\theta + F_{cd}\,\omega\, Sinh\theta)\,(Cos\theta - D\omega\, Sin\theta) + \\ \quad (1/\omega\, Sinh\theta + F_{cd}\, Cosh\theta) \times (-\,\omega\, Sin\theta) \end{array} \right\}$$

$$M_{12} = \left\{ \begin{array}{l} (Cosh\theta + F_{cd}\,\omega\, Sinh\theta)\,(1/\omega\, Sin\theta + D\, Cos\theta) + \\ \quad (1/\omega\, Sinh\theta + F_{cd}\, Cosh\theta)\,(Cos\theta) \end{array} \right\}$$

$$M_{21} = \left\{ \omega Sinh\theta\,(Cos\theta - D\omega\, Sin\theta) + Cosh\theta\,(-\,\omega Sin\theta) \right\}$$

$$M_{22} = \left\{ \omega Sinh\theta\,(1/\omega\, Sin\theta + D\, Cosh\theta) + Cos\theta\,(Cos\theta) \right\} \qquad (9.95)$$

எனக் குறிப்போமானால், சமன் 9.94-லிருந்து,

$$x_1 = M_{11}\, x + M_{12} M\, x' \qquad (9.96)$$

$$x_1' = M_{21}\, x + M_{22}\, x' \qquad (9.97)$$

என்று பெறலாம். உள்ளிடு கற்றையைக் கருதுவோமெனில் $x = x$ ஆகும், சரிவு $x' = 0$ ஆகும். மேலும், முக்கியக் குவியத்தில் $x_1 = 0$ எனவே,

$$0 = M_{11} x \qquad (9.98)$$

என்ற தொடர்பைப் பெறலாம்.

$$\therefore 0 = x\left[\left\{(Cosh\theta + F_{cd}\,\omega Sinh\theta)\,(Cos - D\omega Sin\theta)\right\} + \left\{(1/\omega\ Sinh\theta + F_{cd}\,Cos\theta)(-\omega Sin\theta)\right\}\right]$$

ஆகும்.

அல்லது, $Cosh\theta\ Cos\theta - D\omega\ Cosh\theta\ Sin\theta + F_{cd}\,\omega\ Sinh\theta\ Cos\theta - F_{cd}D\,\omega^2\ Sinh\theta\ \ Sin\theta - Sinh\theta\ Sin\theta - F_{cd}\,\omega\ Sinh\theta\ Sinh\theta = 0$ (9.99)

எனவே, சமன் 9.99 ஐ $Sin\theta\ Sinh\theta$ - ஆல் வகுக்க

$$F_{cd}\,(\omega\ Cot\theta - D\omega^2 - \omega\ Coth\theta) + (Cot\theta\ Coth\theta - D\omega\ Coth\theta - 1) = 0$$

$$\therefore F_{cd} = \frac{-\ Cot\theta oth\theta + D\omega\ Coth\theta + 1}{\omega\ Cot\theta - D\omega^2 - \omega\ Coth\ \theta} \qquad (9.100)$$

இனி, சமன் 9.87-லிருந்து $Cot\theta = f_c\omega$ எனவும், சமன் 9.93 - லிருந்து $Coth\theta = -f_d\,\omega$ எனவும் குறிக்கலாம்.

$$\therefore\ F_{cd} = \frac{f_c f_d\omega^2 - D\omega^2 f_d + 1}{\omega^2 f_c - D\omega^2 + \omega^2 f_d}$$

அல்லது,
$$F_{cd} = \frac{\left\{f_d\,(f_c - D) + 1/\omega^2\right\}}{(f_c + f_d - D)} \qquad (9.101)$$

குவித்து விரிக்கின்ற இணையின் (Converging Diverging Pair) குவியத் தூரத்திற்கான கோவையைப் பெற்றோம். இனி, விரித்துக் குவிக்கின்ற இணையின் (Diverging Converging Pair) குவிய தூரத் திற்கான கோவையைப் பெறலாம்.

9.14. விரித்துக் குவிக்கும் இணை (Diverging Converging Pair)

நால்துருவ வில்லையிலுள்ள இரு காந்தங்களில் முதல் காந்தம் x திசையில் குவிப்பதாகவும், இரண்டாவது காந்தம் x திசையில் குவிதலகற்றுவதாகவும் செயல்படும் எனக் கண்டோம். இனி, செங்குத்துத் திசையில் துகளின் இயக்கம்பற்றிக் காணலாம். நாம் முன்னர்க் கண்ட இணையையே இவ்வியக்கத்திற்கும் கருதலாமெனில், முதல் காந்தம் y திசையில் குவிதலகற்றுவதாகவும், இரண்டாம் காந்தம் குவிப்பதாகவும் செயல்படும். நாம் முன்னர் தருவித்த கோவை 9.94 குவித்து விரிக்கும் வில்லைகளின் இணைக்குரியது. எனவே,

y -திசையில் விரித்துக்குவிக்கும் இணையின் இயல்பை ஆராயக்கோவை 9.94 - ல் x-க்குப் பதிலாக y-ஐயும், D-க்குப் பதிலாக F_{dc}-ஐயும், F_{cd}-க்குப் பதிலாக D-யையும் பதிலீடு செய்து, உரிய மேட்ரிக்ஸ்களைப் பெறுவோம்.

இந்த விரித்துக் குவிக்கும் வில்லையின் இயல்புக்கேற்ப அமைந்த மேட்ரிக்ஸ்களின் வரிசையும் பின்வருமாறு அமைய வேண்டும்.

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cos\theta - F_{dc}\,\omega\, Sin\theta & 1/\omega\, Sin\theta + F_{dc}\, Cos\,\theta \\ -\omega\, Sin\theta & Cos\theta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Cosh\,\theta + D\omega\, Sinh\,\theta & 1/\omega\, Sinh\theta + D\, Cosh\,\theta \\ \omega\, Sinh\,\theta & Cosh\,\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_{0'} \end{pmatrix} \tag{9.102}$$

கோவை 9.102 விரித்துக் குவிக்கும் வில்லையின் இயல்பைக் குறிக்கும். உள்ளிடு கற்றைக்கு $y_0 = y_0$ எனவும், சரிவு $y_0' = 0$ எனவும் அமைவதோடு, வெளியிடு கற்றைக்கு $y = 0$ ஆகும். இனி,

$$M_{11} = \left\{ \begin{matrix} (Cos\theta - F_{dc}\,\omega\, Sin\,\theta)\ (Cosh\,\theta + D\,\omega\, Sinh) + \\ (1/\omega\, Sin\theta + F_{dc}\, Cosh\theta)\ (\omega\, Sinh\theta) \end{matrix} \right\}$$

$$M_{12} = \left\{ \begin{matrix} (Cosh - F_{dc}\,\omega\, Sin\,\theta)\,(1/\omega\, Sinh\theta + D\, Cosh\,\theta) + \\ (1/\omega\, Sin\theta + F_{dc}\, Cosh\,\theta)\ \ (Cosh\,\theta) \end{matrix} \right\}$$

$$M_{21} = \left\{ \begin{matrix} (-\,\omega\, Sin\,\theta)\ \ (Cosh\theta + D\,\omega\, Sinh\,\theta) + Cos\theta \\ (\omega\, Sinh\,\theta) \end{matrix} \right\}$$

$$M_{22} = \left\{ \begin{matrix} (-\,\omega\, Sin\theta)\ \ (1/\omega\, Sinh\,\theta + D\, Cosh\,\theta) + \\ Cos\,\theta\, Cosh\,\theta\,. \end{matrix} \right\}$$

எனக் குறித்து, உள்ளிடு கற்றைக்கும் வெளியிடு கற்றைக்கும் உரிய இயல்புகளைப் பொருத்தி,

$$0 = M_{11}\, y_1 \tag{9·103}$$

எனப் பெறலாம்.

அல்லது,

$$0 = \Big\{ (Cos\,\theta - F_{dc}\,\omega\, Sin\,\theta)$$

$$(Cos\theta + D\,\omega\, Sinh\theta\,) + (1/\omega\, Sin\,\theta + F_{dc}\, Cos\theta)\,(\omega\, Sinh\theta) \Big\}\, y_1 \tag{9.104}$$

$$\therefore\ \cos\theta \cosh\theta + D\omega \cos\theta \sinh\theta - F_{dc}\,\omega \sin\theta \cosh\theta$$
$$-F_d D\omega^2 \sin\theta \sinh\theta + \sin\theta \sinh\theta + \omega F_{dc} \sinh\theta \cos\theta = 0 \qquad (9.105)$$

சமன் 9.105 -ஐ $\sin\theta \sinh\theta$ -ஆல் வகுக்க,

$$\cot\theta \coth\theta + D\omega \cot\theta - F_{dc}\,\omega \coth\theta - F_{dc} D\omega^2 + 1 + \omega F_{dc} \cot\theta = 0$$

$$\therefore\ F_{dc}(\omega \cot\theta - D\omega^2 - \omega \coth\theta) + (\cot\theta \coth\theta + D\omega \cot\theta + 1) = 0 \qquad (9.106)$$

ஆனல், $\cot\theta = f_c\,\omega$; $\coth\theta = -f_d\,\omega$ ஆதலால்,

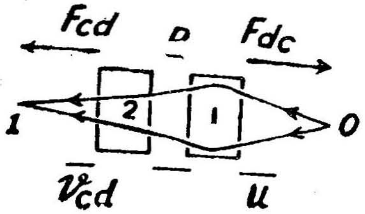
$$F_{dc}(\omega^2 f_c - D\omega^2 + \omega^2 f_d) = -(-f_c f_d \omega^2 + D\omega^2 f_c + 1)$$

$$\therefore\ F_{dc} = \frac{f_c f_d \omega^2 - f_c D\omega^2 - 1}{f_c \omega^2 + f_d \omega^2 - D\omega^2}$$

அல்லது,
$$F_{dc} = \frac{f_c (f_d - D) - 1/k^2}{(f_c + f_d - D)} \qquad (9.107)$$

ஆகும்.

9.15. குவித்து விரிக்கும் இணையின் படிவ, பொருள் தொடர்பு



படம் 9.24 குவித்து விரிக்கும் இணையால் தோன்றும் படிவம்

முன்கண்டவாறு x திசையில் முதல் வில்லை குவிப்பதாகவும், இரண்டாம் வில்லை விரிப்பதாகவும் செயல்பட வல்ல இணையொன்றைக் கருதுக. இரு வில்லைகளுக்கும் இடையேயுள்ள தூரம் D எனவும், முதல் வில்லையின் வலப்பக்கத்திலிருந்து, பொருள் உள்ள தூரம் u எனவும் கொள்வோம். u- ல் உள்ள துகள் முதலில் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியிலும், பின்னர் வில்லை 1 -ன் வழியாகவும் செல்லும். எனவே, இந்த இயக்கத்திற்கு மேட்ரிக்ஸைச் சமன் 9.80-லிருந்து,

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & 1/\omega \sin\theta \\ -\omega \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & u \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (9.108)$$

என்று பெறலாம். இதில், புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியின் நீளம் u ஆகும்.

அல்லது, $\begin{pmatrix} Cos\theta & 1/\omega\ Sin\theta \\ -\omega\ Sin\theta & Cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & u \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

$$=\begin{pmatrix} Cos\theta & u\ Cos\theta + 1/\omega\ Sin\theta \\ -\omega Sin\theta & -u\omega Sin\theta + Cos\theta \end{pmatrix} = M_1 \quad (9.109)$$

எனவே, காந்தப்புலம் செயல்படாப் பகுதி u -ன் வழியேயும், பின்னர் காந்தத்தின் ஊடேயும் அமையும் துகளின் இயக்கத்தை M_1 குறிக்கின்றது. இனி, வில்லை 1-ஐ விட்டுவரும் துகள் இரு வில்லை களுக்கும் இடையேயுள்ள தூரம் D - ஐயும் பின் விரிக்கின்ற காந்தத் தையும் கடக்கிறது. இந்த இயக்கத்திற்குரிய கோவை 9.88 ஐப் போலவே அமையவேண்டும் என்றாலும், மேட்ரிக்ஸ்களின் வரிசை மாறியிருக்கும். அதாவது,

$$\begin{pmatrix} Cosh\theta & 1/\omega\ Sinh\theta \\ \omega\ Sinh\theta & Cosh\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & D \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9.110)$$

என்ற தொடரே துகளின் இயக்கத்தைக் குறிக்கும்.

$$\begin{pmatrix} Cosh\theta & 1/\omega\ Sinh\theta \\ \omega\ Sinh\theta & Cosh\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & D \\ 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} Cosh\theta & D\ Cosh\theta + 1/\omega\ Sinh\theta \\ \omega\ Sinh\theta & D\ \omega\ Sinh\theta + Cosh\theta \end{pmatrix} = M_2 \quad (9.111)$$

மேட்ரிக்ஸ் M_2, D நீளமுள்ள புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியிலும் பின்னர் 2-ம் வில்லையின் ஊடேயும் துகளின் இயக்கத்தைக் குறிக்கின்றது. இனி, விரிக்கும் வில்லையிலிருந்து வெளிவரும் துகள் கற்றை v தூரத்தில் படிவத்தை உருவாக்குகின்றது (படம் 9.24). துகள்களின் தோற்று வாய் $x=0$ ஆக அமையும் இடத்தில் உள்ளது. அத் தோற்றுவாயை விட்டு வெளிவரும் கற்றை x' சரிவு பெற்றிருக்குமெனக் கொள்ளலாம். படிவம் அச்சில் தோன்றும் இடத்தில் $x_1=0$ ஆகும்; அயனிகள் வில்லையை விட்டு இவ்விடத்தில் குவியும் போது சரிவு x'_1 ஆகும்.

எனவே, துகள்கள் *O* - விலிருந்து புறப்பட்டு *I* - உடன் முடியும் வரை அமையும் இயக்கத்திற்குரிய கோவை,

$$\begin{pmatrix} 0 \\ x'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & v \\ 0 & 1 \end{pmatrix} M_2 M_1 \begin{pmatrix} 0 \\ x' \end{pmatrix} \qquad (9.112)$$

என்றாகும். இதில் $M_2 M_1 = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}$ (9.113)

ஆகும். $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$ என்னும் கூறுகள் பின்வரும் மதிப்பைப் பெற்றிருக்கும்.

$$M_{11} = (Cosh\theta Cos\theta + D\ Cosh\theta + 1/\omega\ Sinh\theta)\ (-\omega Sin\theta)$$

$$M_{12} = Cosh\theta\ (u\ Cos\theta + 1/\omega\ Sin\theta) + (D\ Cosh\theta + 1/\omega\ Sinh\theta)\ (-u\omega\ Sin\theta + Cos\theta)$$

$$M_{21} = \omega\ Sinh\theta\ Cos\theta + (D\omega\ Sinh\theta + Cosh\theta)\ (-\omega\ Sin\theta)$$

$$M_{22} = \omega\ Sinh\theta\ (u\ Cos\theta + 1/\omega\ Sin\theta) + (D\ \omega\ Sinh\theta + Cosh\theta)\ (-u\ \omega Sin\theta + Cos\theta)$$

கோவை 9.112 -லிருந்து,

$$\begin{pmatrix} 0 \\ x_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} + v\ M_{21} & M_{12} + vM_{22} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ x' \end{pmatrix} \qquad (9.114)$$

$$\therefore \qquad 0 = x'\ (M_{12} + v\ M_{22}) \qquad (9.115)$$

$$x_1' = x'\ M_{22} \qquad (9.116)$$

சமன் 9.115ல், M_{12}, M_{22} ஆகிய மேட்ரிக்ஸ்களைப் பதிலீடு செய்ய,

$$x' \left\{ Cosh\theta\ (u\ Cos\theta + 1/\omega\ Sin\theta) + (D\ Cosh\theta + 1/\omega\ Sinh\theta)\ (-u\ \omega\ Sinh\theta + Cos\theta) \right\}$$

$$+ v \left\{ \omega\ Sinh\theta\ (u\ Cos\theta + 1/\omega\ Sin\theta) + (D\ \omega\ Sinh\theta + Cosh\theta)\ (-u\ \omega\ Sin\theta + Cos\theta) \right\}$$

$$= 0$$

ஆகும்.

$$\therefore u \, Cosh\theta \; Cos\theta + 1/\omega \, Sin\theta \; Cosh\theta - u \, D \, \omega \, Cosh\theta \; Sin\theta + D \; Cosh\theta \; Cos\theta - u \; Sinh\theta \; Sin\theta + 1/\omega \; Sinh\theta \; Cos\theta + v \, \omega \, u \; Sinh\theta \; Cos\theta + v \, Sinh\theta \; Sin\theta - v \, D \, \omega^2 u \; Sinh\theta \; Sin\theta + v \, D \, \omega \; Sinh\theta Cos\theta - v \, u \, \omega \; Cosh\theta \; Sin\theta + v \; Cosh\theta \; Cos\theta = 0 \quad (9.117)$$

சமன் 9.117-ஐ $Sinh\theta \; Sin\theta$ -ஆல் வகுக்க,

$$- u \, Coth\theta \; Cot\theta + 1/\omega \, Coth\theta - u \, D \, \omega \, Coth\theta + D \, Coth\theta \; Cot\theta - u + 1/\omega Cot\theta + v \, \omega \, u \, Cot\theta + v - v \, D \, \omega^2 u + v \, D \, \omega \; Cot\theta - v \, u \, \omega Coth\theta + v \; Coth\theta \; Cot\theta = 0 \quad (9.118)$$

$Coth\theta = -f_d \, \omega$, $Cot\theta = f_c \, \omega$ எனவும் குறிக்கலாமாதலால் சமன் 9.118 பின்வருமாறு மாறும்.

$$- u f_d f_c \omega^2 - f_d + uD \, \omega^2 f_d - f_c f_d \omega^2 D - u + f_c + v \, \omega^2 u f_c + v - v \, D \, \omega^2 u + v \, D \, \omega^2 f_c + v \, u \, \omega^2 \, f_d - v f_c f_d \, \omega^2 = 0 \quad (9.119)$$

$$\therefore u\,(-f_d f_c + f_d D - 1/\omega^2) + v(-f_c f_d + f_c D + 1/\omega^2) - f_d/\omega^2 + f_c/\omega^2 - f_c f_d D + u \, v f_c + u \, v \, f_d - v \, D \, u = 0$$

$$\therefore u \, \frac{\{ f_d (f_c - D) + 1/\omega^2 \}}{(f_c + f_d - D)} + \frac{(f_d - f_c + f_c f_d \, D\omega^2)}{\omega^2 (f_c + f_d - D)} = \frac{vu (f_c + f_d - D)}{(f_c + f_d - D)} - \frac{v\{ f_c (f_d - D) - 1/\omega^2 \}}{(f_c + f_d - D)} \quad (9.120)$$

எனவே,
$$F_{cd} = \frac{f_d (f_c - D) + 1/\omega^2}{f_c + f_d - D}$$

என்றும்,
$$F_{dc} = \frac{f_c (f_d - D) + 1/\omega^2}{f_c + f_d - D}$$

என்றும்,

அறிவோமாதலால்,

$$uF_{cd} + \left\{ \frac{f_d - f_c + f_c \, f_d \, D\omega^2}{\omega^2 \, (f_c + f_d - D)} \right\} = vu - v \, F_d$$

$$\therefore \; v_{cd} = \frac{\left\{ uF_{cd} + \frac{f_d - f_c + f_c f_d \, D\omega^2}{\omega^2 \, (f_c + f_d - D)} \right\}}{(u - F_{dc})} \quad (9.121)$$

அல்லது, $\frac{f_d - f_c + f_c f_d \, D\omega^2}{\omega^2 (f_c + f_d - D)} = Q$ எனக் குறிப்போமானல்

$$v_{cd} = \frac{(uF_{cd} + Q)}{(u - F_{dc})} \quad (9.122)$$

சமன் 9.122 லிருந்து, குவித்து விரிக்கும் வில்லைகளின் இணையின் மூலம் உருவாகும் படிவம் அமையும் தூரம் v_{cd} -ஐத் தீர்மானிக்கலாம்.

17

இவ்விணையில் முதல் வில்லை x திசையில் குவிப்பதாகவும் இரண்டாம் வில்லை x திசையில் விரிப்பதாகவும் செயல்படும் என்பதை v_{cd} என்ற குறியீடு புலப்படுத்துகின்றது.

9.16. விரித்துக் குவிக்கும் இணையின் படிவ - பொருள் தொடர்பு

x திசையில் குவிதலை உருவாக்கும் வில்லைகளின் இணையை முன்னர் கண்டோம். இனி, செங்குத்துத் திசையில் (y திசையில்) குவிதலை உருவாக்கும் இணையின் இயல்பைக் காண்போம்.

இவ் வில்லையில் முதல் வில்லை விரிக்கும் வில்லையாகவும் இரண்டாம் வில்லை குவிக்கும் வில்லையாகவும் செயல் படும். சமன் 9 122 -ல் பெற்றவாறே இந்த இணையிலும் படிவம் உருவாகும் தூரத்தைக் கணக்கிடலாம். படிவம் உருவாகும் தூரம் v_{dc} எனில்,

$$v_{dc} = \frac{u\,F_{dc} + R}{u - F_{cd}} \qquad (9.123)$$

என்று பெறலாம்.

எனவே, இதுவரை காந்த நால் துருவ வில்லைகளின், விரிக்கும் பண்பினையும் குவிக்கும் பண்பினையும் ஆராய்ந்தோம். இந்த துருவ வில்லைகளின் தத்துவம் முடுக்கும் பொறிகளில் வகிக்கும் பங்கென்ன என்பதை இனிக் காண்போம்.

9.17. இரு முடுக்கிகளைப் பொருத்துவதில் வில்லைகளின் பயன்

துகள்கள் z - ஆயத்திசையில் இயங்குவதாகக் கொள்வோம். இந்தத் துகள்கள் இயங்கும் பகுதியில் செயல்படும் காந்தப்புலம் கிடைத்திசையிலும் செங்குத்துத்திசையிலும் குவிதலை உருவாக்க வல்லதெனவும், இரு திசைகளையும் சார்ந்த இயக்கங்கள் தனித் தனியே நிகழ்வதாகவும், ஒவ்வொரு இயக்கத்தையும் $y = y_m \, Sin\, \omega_y t$ என்ற தொடரால் குறிக்கலாம் எனவும் கொள்க. குறுக்காக அமையும் உந்தம் (*Transverse Momentum*) p_y எனில்

$$p_y = M \frac{dy}{dt}$$

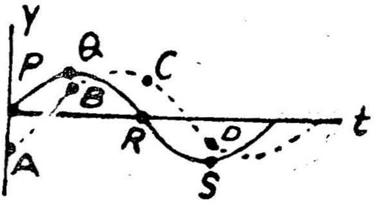
$$\therefore\ p_y = M\omega_y\, y_m\, Cos\,\omega_y\, t \qquad (9.124)$$

ஆகும்.

துகள்கள் இயங்கும் பாதையில் எந்தவொரு புள்ளியிலும், எல்லா வகையான கலைக்கோணங்களும் உடைய துகள்கள் இருக்கும். துகள்களின் குறுக்கு இயக்கத்தில் ஏற்படும் அலைவுகளின் வீச்சுகள் சுழியத்தில் இருந்து குறிப்பிட்டதொரு பெருமம் வரை இருக்கும். இந்த அலைவுகளின் பெரும வீச்சானது வெற்றிட அறையின் குறுக்கு

அளவுகளைப் பொறுத்து அமையும். இவ்வாறு அலைகின்ற துகள்களின் தடங்களைத் தீர்மானிக்கக் கலைக்கோணப் படம் *(Phase Diagram)* ஒன்றைக் கருதுவோம்.

குறுக்கு வாட்டாக இயக்கத்திற்கு உட்படும் எந்தத் துகளின் இயக்கமும் படம் 9.25 - ல் உள்ளவாறே அமையும். காலத்தைச் சார்ந்து மாறுபடும் அந்தத் துகளின் நிலை P,Q,R, Sபோன்ற புள்ளிகளால் குறிக்கப் பெற்றுள் ளது. இதில் Q என்னும் புள்ளியை அடையும்போது துகள் பெரும இடப் பெயர்ச்சியை அடையும் என்பதைப் படம் 9.25 விளக்கும்.



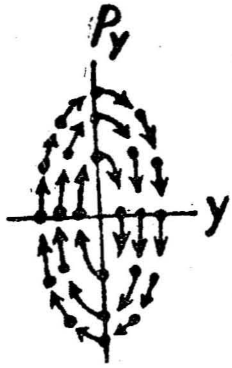
படம் 9.25
கலைக்கோணப் படம் (Phase Diagram)

இந்தத் துகளின் வீச்சும், ஆனால் வேறு கலைக்கோணமும் உடைய மற்றொரு துகளைக் கருதுவோம். இந்தத் துகளின் பாதை ABCD என்று அமைகின்றது. முதல் துகள் P,Q,R,S என்னும் புள்ளிகளை நெருங்கும் போது, இரண்டாம் துகள் A,B,C,D என்னும் புள்ளிகளை அடையும்.

இனி, துகளின் உந்தம் p_y- க்கும் இடப்பெயர்ச்சிக்கும் இடையே அமையும் தொடர்பைக் கலைக்கோணப் படம் 9.26 விளக்கும். இந்தப் படத்தில் துகளின் பாதை நீள் வட்ட வடிவில் இருக்கும். பேரச்சாக *(Major Anis)* p_{ym}-ம், சிற்றச்சாக *(Minor Anis)* y_m-ம் உள்ளன. துகள் P என்ற புள்ளியை அடையும்போது உந்தம் பெரும மதிப்பைப் பெறுகின்றது. மேலும் இடப்பெயர்ச்சி சுழியமாகின்றது. துகள் Q என்னும் புள்ளியை அடையும்போதோ இடப்பெயர்ச்சி பெருமமாகின்றது, உந்தமோ சுழியமாகின்றது. எனவே, சமமான வீச்சும் வெவ்வேறு கலைக் கோணங்களும் உடைய துகள்கள் $p_y y$ தளத்தில் உரிய புள்ளிகளால் குறிக்கப் பெறும். இந்தத் துகள்கள் வெவ்வேறு கலைக்கோணம் உடையனவாக இருப்பதால் ஒரே நீள் வட்டத்தில் இயங்கும். அதாவது $p_y y$ - தளத்தில் அமைந்த ஒவ்வொரு புள்ளியும் தனித்தனியாக ஒரே நீள்வட்டத்தில் இயங்கும்.

படம் 9.26
p_yக்கும் yக்கும் இடையேயான தொடர்பு

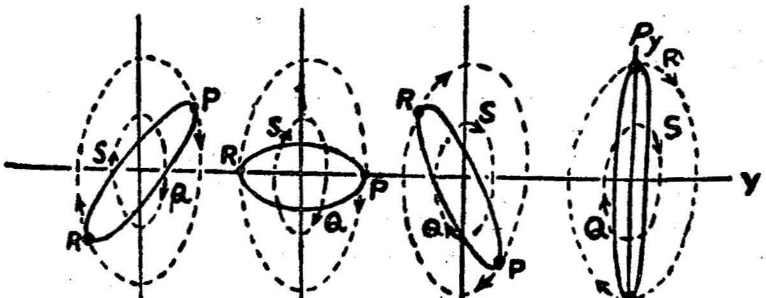
இனி, ஓரளவு குறைந்த பெரும வீச்சுடைய துகள்களின் பாதையின் அமைப்பைக் காணுவோம். இந்தத் துகள்களின் அலைவுகளும் சைன் அலைவுகளாகவே அமையும். இவற்றின் பாதை $p_y y$ தளத்தில் குறிக்கப் பெறுமானால் நீள்வட்ட வடிவிலேயே இருக்கும்.



படம் 9.27 வெவ்வேறு வீச்சுடைய அயனிகளின் கலைக்கோணப் படம்

ஆனால் இந்த நீள்வட்டம் பெரும வீச்சிற்குரிய நீள்வட்டத்திற்கு உள்ளேயே அமைந்து விடும். எனவே, பெரும வீச்சுடைய துகள்களின் பாதைகள் யாவுமே படம் 9.27 -ல் உள்ளவாறு வரம்பு நீள்வட்டத்திற்குள்ளேயே *(Within Limiting Ellipse)* அடங்கிவிடும். இந்த நீள் வட்டங்களில் உள்ள ஒவ்வொரு புள்ளியும் ஒரு துகளைக் குறிக்கின்றது. கலைக்கோண வெளியில் *(Phase Space)* உள்ள ஒவ்வொரு புள்ளியும் ஒரு துகளைக் குறிப்பதால் லியோன் வில்லியின் தேற்றப்படி *(Lion Villes Theorem)* துகள்கள் இழந்து போகாமல் இருக்கும்போது, ஏதாவது மாற்றம் ஏற்படுமெனில், துகள் இயங்கும் வெளியின் வடிவம் மாறுமேயல்லாமல் அதன் பரப்பு மாறாது என்பது பெறப்படும்

காட்டாக, திடீரென குவிக்கும் விசைகள் விலக்கப்படுமெனில் துகளின்பாதை அடையும் மாற்றத்தைக் காணலாம். குவிக்கும் புலம் திடீரென விலக்கப்படுவதால் இந்தப் பகுதியில் நுழையும் துகள்களின்



படம் 9.28 குவிக்கும் புலத்தில் துகள்

தடம் நேர் கோடுகளாக அமையும். ஒவ்வொரு துகளினுடைய குறுக்குவாட்டு உந்தமும் *(Transverse Momentum)* மாற்றம்

எதுவும் அடையாது. ஆனால், துகளின் பக்கப் பெயர்ச்சி (*Lateral Displacement*) அதிகரிக்கும். ஆகவே, ஒவ்வொரு துகளின் உந்தமும் மாறிலியாக இருப்பதால்,ஒவ்வொரு புள்ளியும் *y* அச்சிற்கு இணையாக இயங்கத் தொடங்கும். எனவே, நீள்வட்டம் சறுக்குப் பெயர்ச்சி (*Sheatred*) அடைந்துள்ளது எனலாம். ஆனால், நீள்வட்டப் பரப்பில் மாற்றம் எதுவும் ஏற்படாது. புல ஆதிக்கமற்ற பகுதி நீண்டதாக இருக்குமானால் சறுக்குப் பெயர்ச்சியும் அதிகமாகும்.

இவ்விதம் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியில் சறுக்குப் பெயர்ச்சி அடைந்து இயங்கும் துகள்கள் மீண்டும் குவிக்கும் புலத்தினுள் நுழைவதாகக் கொள்ளலாம். இந்தக் குவிக்கும் புலம் முதலில் இருந்த புலத்தைப் போலவே பண்புடையதெனில், அதை அணுகும் துகள்கள் மீண்டும் சைன் அலைவுகளுக்கு உட்படும். இதனால் கலைக்கோணத் தளத்தில் அமைந்த ஒவ்வொரு புள்ளியும் மீண்டும் நீள்வட்டத்தில் இயங்கும். இனி, காலம் உயர உயர, வரம்பு நீள்வட்டமும் அதற்குள்ளேயே அமைந்த பிற நீள்வட்டங்களும் சுழல்வது போலத் தோன்றும். இவ்விதம் நீள்வட்டங்கள் சுழல்வது புரொபெல்லார் (*Propellar*) மாறுகின்ற நீள அகலத்துடன் சுழல்வதுபோல் தோன்றும்.

துகள்கள் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியிலிருந்து குவிக்கும் புலத்தினுள் நுழையும் தருணத்தில் கலைக்கோண வெளியின் அமைப்பு, படம் 9.28 (*a*) - ல் உள்ளது போல் அமையட்டும். இவ் வமைப்புடன் குவிக்கும் புலத்தினுள் நுழையுமெனில், படங்கள் 9.28(*b*), 9,28(*c*), 9.28(*d*) இவற்றில் உள்ளவாறு தொடர்ந்து சுழலத் தொடங்கும்.

படம் 9.28(*b*) - ல் உள்ள அமைப்பைக் காணும் போது விரிவு (*Divergence*) மிகக் குறைவாக உள்ளது புலப்படும். எனவே, இந்த அமைப்பில் துகள் இயங்கும்போது, அதை மீண்டும் புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியில் இயங்கவைக்க விரும்பினால் அவ்விதம் செய்தல் உகந்ததாகும். ஏனெனில், துகள் கற்றையின் விரிவு குறைவாக இருப்பதால், புல ஆதிக்கமற்ற பகுதியில் இயங்குகையில், துகள் கற்றை பக்கவாட்டில் விரிவடையாது.

படம் 9.28(*d*) - ல் உள்ள அமைப்பில் கற்றை மிகக்குறுகியதாக இருப்பதை அறியலாம். எனவே, இவ்வமைப்புடைய தருணத்தில் கற்றையைக் குவிப்பது எளிமையாகும். ஆகவே, இலக்கு ஒன்றைப் பயன்படுத்தி ஆய்வு நிகழ்த்த, இந்த அமைப்படையும் தருணத்தில் கற்றையைப் பயன்படுத்தல் நலம்.

இனி, ஒரு முடுக்கும் பொறியிலிருந்து மற்றொன்றிற்குத் துகள்களை அனுப்ப வேண்டுமெனில், துகளின் கலைக்கோணத் தடம் எப்படி அமையவேண்டும் என்று காண்போம்.

துகள்களை முதலிலேயே குறிப்பிட்டதொரு ஆற்றல் பெறுமாறு செய்த பின்னர்தான் சிங்க்ரோட்ரான் போன்ற பொறியினுள் செலுத்த வேண்டியுள்ளது. எனவே, நேரியல் பொறியில் இயங்கி ஆற்றல் பெற்ற துகள்களைச் சிங்க்ரோட்ரானுள் செலுத்துதல் மரபு. இவ்விதம் செலுத்தும்போது இழப்பு ஏதுமின்றிப் பார்த்துக் கொள்ளவேண்டும்.

நேரியல் பொறியில் இயங்கும் துகள்களின் தடம் கலைக்கோணத் தளத்தில் நீள்வட்ட வடிவம் உடையதாக இருக்கும். நேரியல் பொறியில் உள்ளதைப் போலவே சிங்க்ரோட்ரானிலும் குவிக்கும் விசைகள் செயல்படுமெனில், அதில் அமையும் நீள்வட்டமும் நேரியல் பொறிக்கு உரியதைப் போலவே இருக்கும். எனவே, நேரியல் பொறியைச் சிங்க்ரோட்ரானுடன் பொருத்தினால் இழப்பேதும் இன்றித் துகள்கள் சிங்க்ரோட்ரானுள் நுழையும். ஆனால், இது ஓர் இலட்சியச் சூழ்நிலையாகும். நடைமுறையில், இவ்விதம் இரு பொறிகளையும் இணைக்கும்போது இரண்டுக்கும் இடையே புல ஆதிக்கமற்ற வெளியும் அமையும். எனவே, துகள்களை இழப்பின்றிக் காப்பது அரிதாகின்றது.

நேரியல் பொறியிலிருந்து, புல ஆதிக்கமற்ற வெளியில் நுழையும் துகள்களின் நீள்வட்டத்தடம் சறுக்குப் பெயர்ச்சி அடையும். எனவே, சிங்க்ரோட்ரானில் நுழையும்போது துகள்களின் தடம், அதனுள் உள்ள நீள்வட்டத்துடன் பொருந்தாது. ஆகவே துகள்களின் தடம் சறுக்குப் பெயர்ச்சி அடைந்து சிங்க்ரோட்ரானில் நுழைந்ததும் புரொபெல்லரைப் போல் சுழலும். இதனால் சிங்க்ரோட்ரானுக்கே உரிய நீள்வட்டத்தினுள் அடங்கும் துகள்கள் மட்டுமே தொடர்ந்து இயங்கும். பிற துகள்கள் சிங்க்ரோட்ரான் சுவரில் மோதித் தவறிப் போகும்.

எனவே, இத்தகு இழப்பை விலக்கச் சிங்க்ரோட்ரானின் அளவைப் பெரிதாக்குவதன் மூலம் அதற்குரிய நீள்வட்டத்தைப் பெரிதாக்கலாம். ஆகவே, நேரியல் பொறியிலிருந்து சிங்க்ரோட்ரானில் நுழைந்து இந்த நீள்வட்டத்திற்குள் சுழலும் துகள்கள் மட்டுமே இழப்பு அடையா. ஆனால், இவ்விதம் இழப்பை விலக்க அதிகம் செலவாகும். எனவே, வேறு உத்திகளைக் கையாள வேண்டிய கட்டாயம் தோன்றியது. இதனால், நால்துருவ வில்லைகளைப் பயன்படுத்தித் துகள்களை நெறிப்படுத்த முயற்சிகள் மேற்கொள்ளப் பட்டன.

துகள்கள் z திசையில் இயங்குவதாகவும், குறுக்கு வாட்டு உந்தம் p_y எனவும் அறிவோம். துகளின் கோண அதிர்வெண் ω_y எனில்

$$\omega_y t = \frac{2\pi v}{\lambda} t$$

ஆகும். அல்லது, $\omega_y t = \dfrac{2\pi z}{\lambda}$ $[\because vt = z]$

மேலும், $y = y_m \, Sin \, \omega_y t$

ஆதலால், $$y = y_m \, Sin \left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \qquad (9.125)$$

ஆகும்.

$$\frac{dy}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} y_m \, Cos \left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right)$$

இனி, $\dfrac{dy}{dz} = tan \, \theta_y$

எனில்,

$$tan \, \theta_y = \frac{2\pi}{\lambda} y_m \, Cos \left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \qquad (9.126)$$

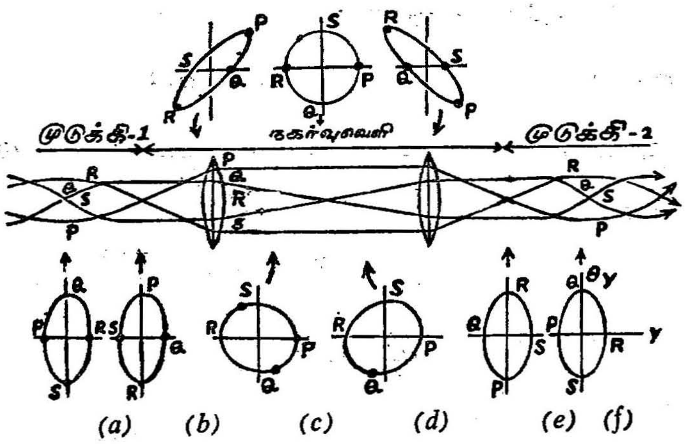
θ_y - என்ற கோணம் விரிகோணம் (*Angle of Divergence*) எனப்படும்

θ_y - சிறிய மதிப்புடையதெனில், $\theta_y = \dfrac{2\pi}{\lambda} y_m \, Cos \left(\dfrac{2\pi z}{\lambda}\right)$ (9.127)

என்றே எழுதலாம். எனவே y க்கும் p_y க்கும் இடையே வரைந்த தைப்போல் θ_y க்கும் y க்கும் இடையிலும் வரைபடம் வரையலாம்.

நால்துருவ வில்லைகளைப் பயன்படுத்திக் குறுக்கு இடப் பெயர்ச்சிக்குத் தக்கவாறு θ_y - ஐ மாற்றலாம். முடுக்கி 1-லிருந்து நகர்வு வெளியில் (*Drift space*) இயங்கும்போது, துகளின் கலைக் கோணத் தடம் y ஆயத்திற்கு இணையாக சறுக்குப் பெயர்ச்சி அடையலாம் என அறிவோம். இனி, நால்துருவ வில்லையைப் பயன் படுத்துவதன் மூலம் கலைக்கோணத் தடத்தை p_y அச்சுக்கு இணையாகச் சறுக்குப் பெயர்ச்சி அடையச் செய்யலாம். இரு சறுக்குப் பெயர்ச்சி களும் ஒருங்கே நிகழுமெனில் தொகுபயனாக விளையும் துகளின் தடம் தொடக்கத்தில் அமைந்தவாறே நீள்வட்டமாக அமையும். எனவே, இனி இந்தத் துகள்கள், முடுக்கி 2 – ல் நுழையுமெனில் (படம் 9.29) இழப்பின்றி ஆற்றல் வளம் பெருக்கிக் கொள்ளும்.

படம் 9.29 (a) -ல் உள்ள நீள்வட்டம் முதல் முடுக்கியில் துகளின் கலைக்கோணத் தடத்தைக் குறிக்கின்றது. இப் பொறியை விட்டு நகர்வு வெளியில் துகள் இயங்கத் தொடங்கும்போது படம் 9.29 (b)-ல் உள்ளதுபோல் துகளின் தடம் அமையும். முதல் வில்லையை விட்டு வெளிவந்ததும் துகளின் தடம் 9.29 (c) -ல் உள்ள வடிவம்



படம் 9.29
துகள் முடுக்கிகளைப் பொருத்துதல்

பெறும். பின், நகர்வு வெளியில் இயங்கி இரண்டாம் வில்லையை விட்டு வெளிவந்தவுடன் தடம் 9.29 (e) -ல் உள்ள அமைப்பு உடைய தாகும். எனவே, இரண்டாம் முடுக்கியில் நுழையும்போது துகளின் தடம் 9.29 (f) -ல் உள்ள வடிவம் பெற்று, இரண்டாம் முடுக்கிக்கு ஏற்றதாக அமைவதால், இழப்பேதும் இன்றி துகள்கள் காக்கப் படும். எனவே, வன்குவிப்புத் தத்துவத்தால் பிறந்த இந்த நால்துருவ வில்லைகள் பேருதவி புரிகின்றன என்பது விளங்கும்.

9.18. முடிவுரை

முடுக்கும் பொறிகள் யாவற்றிலும் வெள்ளிடை மலையென விளங்குகின்ற அரும்பொறிகளில் செயல்படும் செம்மையான தத்துவங்களைக் கண்டோம். வன்குவிப்புக் காந்த வில்லையானது குழி-குவி வில்லைத் தொகுப்பைப் போல் செயல்பட்டு, தேவையான திசை களில் வன்குவிப்பை உருவாக்கும் எனக் கண்டோம். வன்குவிப்புப் பொறியில் எழும் பீட்டாட்ரான் அலைவுகள் வீச்சு மிகுந்தனவாதலால் அவற்றைக் கட்டுப்படுத்தவேண்டிய அவசியம் பற்றியும் கூறப் பட்டது.

மேட்ரிக்ஸ் முறையைப் பயன்படுத்தி, ஆய்த்திசை ஆரத்திசை ஆகிய இரு திசைகளிலும் நிலைப்பாடுபெற எழுந்த ஆய்வில் கழுத்துக் கச்சைப் படம் என்ற கருத்துத் துணைசெய்கிறது என்பதும் விளக்கப் பட்டது. பொறி பற்றிய இயக்கும் புள்ளியானது படத்தின் நிலைப் பாட்டு எல்லைக்குள் அடங்குமாறு, பொறியின் அளபுருபுகள் அமைய வேண்டும் என்பதும் கூறப்பட்டது.

கலைக்கோண நிலைப்பாடு பற்றி ஆராய்ந்தபோது, வன்குவிப்புப் பொறிகளில் உந்த இறுக்கம் $a > \tau_1$ ஆக அமையும் எனவும், திரிவு நிலை ஆற்றலில் $a = \gamma$ எனவும் கண்டோம்.

வன்குவிப்பு வில்லைகளின் தொகுப்பை ஆராய்ந்து, ஒரு பொறி யிலிருந்து மற்றொரு பொறிக்குத் துகள்களைச் சிதறிப் போகாமல் செலுத்துவது எப்படி என்பதும் கூறப்பட்டது.

மேலும், இந்த வன்குவிப்புப் பொறிகளில் உயர்ந்த ஆற்றல்களை அடைய முடியும் என்றும் கண்டோம். எலெக்ட்ரான், புரோட்டான் போன்ற துகள்களை முடுக்கப் பயன்படும் இப் பொறிகளில் துகள் முடுக்கிகள் பற்றிய வளர்ச்சியின் செழுமையைக் காணலாம். சைக்ளோட்ரான் போன்ற பொறிகளில் பயன்படுத்தப்பட்ட பெரும் காந்தங்களுக்குப் பதிலாகப் பல சிறிய காந்தத் துண்டுகளே பயன் படும் இந்தப் பொறியின் சிறப்பு விளங்கலாகும்.

10. பொறிகளும் புதுமைகளும்

10. 1. முன்னுரை

இதுகாறும் ஒன்பது அத்தியாயங்களில் துகள் முடுக்கும் பொறிகளின் தத்துவங்கள், விளக்கங்கள், செயற்பாடுகள் முதலியவற்றைப் பற்றி விரிவாகக் கண்டோம். அறிமுகம், ஆய்வுரை விளக்கங்கள் என்ற தலைப்புகளில் இப் பொறிகள் வளர்ந்த வரலாறும், இவைபற்றிய பொதுக் கருத்துகளும் முன்னுரையாகக் கூறப்பட்டன. பிறகு எழுந்த ஏழு அத்தியாங்களிலும், ஏழு வகையான முடுக்கும்பொறிகள் பற்றிய சிறப்புரைகள் இடம் பெற்றன. இப் பொறிகளின் வரலாற்றில் சிறந்தோங்கி விளங்கும் வளர்ச்சி நிலைகளின் விளக்கங்களை அந்தந்த அத்தியாயங்கள் கூறும். இவ்வகையில் இவ் வரலாறு ஏழ்நிலை மாடமெனக் காட்சியளிப்பதனைக் காணலாம். இந்தியக் கலைச் செல்வங்கள் எவ்வாறு அவ்வப்பொழுது மேம்பாடு பெற்று மாமல்லபுரம், சித்தன்னவாசல், அஜந்தா, எல்லோரா முதலிய இடங்களில் இன்றும் அழகு நிலையங்களாகத் திகழ்கின்றனவோ, அவ்வாறே ஏழ்நிலைப் பொறிகளும் எழில் நலம் பகர்கின்றன என்று கூறுவது மிகையாகாது.

இந் நூலில் விளக்கம் பெறும் பொறிகளின் துணையினுல் துகள்களை முடுக்குகிறேம், ஆற்றல் பெறுமாறு செய்கிறேம் என்பது பல இடங்களில் விளக்கப்பட்டது. இத் துகள்கள் மிகமிகச் சிறியவை என்பதை மீண்டும் நினைவு கூர்தல் நன்று. தொடக்கத்தில் அமைந்த சைக்ளோட்ரான் துணையினுல் துகள்களை 1 *MeV* ஆற்றல் பெறுமாறு செய்த அறிவியலாளர்கள், இன்றைய நிலையில் 30 *BeV* ஆற்றல் பெறுமாறு செய்கிருர்கள். அதாவது, இப்பொறிகள், செயல்திறனில் முதல் சைக்ளோட்ரானை நோக்கும்போது முப்பதாயிரம் மடங்கு உயர்வு பெற்றுள்ளன என்று கூறலாம். சிக்காகோவிற்கு அருகில் பட்டோவியா என்னுமிடத்தில் நிறுவப்பட்டவொரு பொறியின் வாயிலாக 200 *BeV* ஆற்றலுள்ள புரோட்டான்கள் கிடைக்கின்றன

என்று அண்மையில் கிடைத்த செய்தியொன்று கூறுகிறது. பொறிகளின் அமைப்பிலும் வியத்தகு முன்னேற்றத்தினைக் காணலாம். சில சதுர மீட்டர் பரப்பில் அமைக்கப்பெற்ற பொறிகளுக்குப் பதிலாக, பல ஆயிரம் சதுர மீட்டர் பரப்பில் அமைக்கப்பெற்ற பொறிகள் இன்று விளங்குகின்றன. புரூக்ஹேவன், சேர்ன் (*CERN*), டியூப்னு ஆகிய இடங்களில் செயல்படும் அரும்பொறிகள் இதற்கு எடுத்துக் காட்டுகளாகும். புரூக்ஹேவன் அரும்பொறியினை நிறுவுவதற்கு ஐம்பது கோடி ரூபாய் செலவாயிற்று என்று அறிகிறோம். இவ்வளவு பொறியொன்று அமைக்கப்படும் போது அதற்கான திட்டங்கள், பெருஞ் செலவில் முன்னேற்பாடுகள், அதனை இயக்கும் முறைகள், பின்னர் எதிர்பார்க்கும் பயன்கள் ஆகியவை பற்றிய அருமைப் பாடுகள் கூறாமலே விளங்கும்.

இன்றைய இயற்பியலில் அணுக்கரு இயற்பியல் (*Nuclear Physics*) சிறப்பிடம் வகிக்கிறது. இச்சிறப்பியலைச் சார்ந்து பல அறிவியல் துறைகள் வளரத் தொடங்கிவிட்டன. நம் நாட்டில் அண்டவெளி இயற்பியல் (*Space Physics*) என்றவொரு துறை, அணுக்கரு இயற்பியல் துறையிலிருந்து அண்மையில் பிரிந்து தனியானவொரு துறையாக விளங்க முற்பட்டிருப்பதனைக் காணலாம். ஆயினும், அடிப்படையாகவுள்ள அணுக்கரு இயற்பியலின் வளர்ச்சி பிறதுறை வளர்ச்சிக்கும் துணைசெய்யும் என்பதில் ஐயமில்லை. சென்ற நாற்பது ஆண்டுகளாக அணுக்கரு பற்றிய அறிவியலில் போற்றத்தக்க வளர்ச்சிகள் ஏற்பட்டுள்ளன. இவ் வளர்ச்சியில் ஏழ்நிலைப் பொறிகளும் சிறந்த பணிகள் ஆற்றியுள்ளன என்பதுபற்றியும் அணுவியலில் அறியப்பட்ட பற்பல புதுமைகள் பற்றியும், தொழிலியல், மருத்துவத்துறை, உயிரியல் முதலிய பல துறைகளிலும் அவை அளிக்கும் பயன்கள் பற்றியும், இவ்வளவு சிறந்த பொறிகளின் வருங்கால வளர்ச்சி பற்றியும், இந்த இறுதி அத்தியாயத்தில் இயம்பி முடிக்கப்பெறும்.

10.2. ஏழ்நிலைப் பொறிகள்

முதல் நிலைப்பொறிகளுக்கு எடுத்துக்காட்டாக அமைந்த வாண்டி கிராஃப் பொறி, காக்ராஃப்ட்—வால்ட்டன் பொறி ஆகியவை பற்றி முதலில் கூறப்பட்டது. நம்நாட்டிலுள்ள பாபா அணு ஆய்வரங்கத்தில் (*Bhabha Atomic Research Centre*) வாண்டிகிராஃப் பொறியொன்று நிறுவப் பெற்று இயங்கி வருகிறது. 5·5 *MeV* ஆற்றலுள்ள துகள்களை இது அளிக்க வல்லது. இதனைப் பயன்படுத்தி அணுவியல் பற்றிய ஆய்வுகள் நடந்துவருகின்றன. காக்ராஃப்ட், வால்ட்டன் ஆகிய இரு விஞ்ஞானிகளும் 1932-ம் ஆண்டிலேயே அணுவினைப் பகுக்கலாம் என்று சோதனைமூலம் விளக்கினார்கள். அவர்கள் பொறியில்

உருவான புரோட்டான் கற்றையினால், லித்தியம் அணுவைத் தாக்கும் போது அந்த அணுவும் புரோட்டானும் இணைந்து, இரண்டு ஆல்ஃபாத் துகள்களாக மாற்றம் பெறுகின்றன. இதனை,

$$_{3}Li^{7} + {}_{1}H^{1} \longrightarrow 2\ {}_{2}H_{e}^{4}$$

என்ற சமன்பாடு குறிக்கும். ஆகவே லித்தியம் (*Lithium*) அணுவிலிருந்து ஹீலியம் (*Helium*) பிறக்கிறது என்பது தெரியவரும். இந்தச் சிறந்த சாதனைக்குப் பின்னர், துகள் முடுக்கும் பொறிகளின் வளர்ச்சியில் பல ஆய்வரங்கங்களும் ஆர்வம் காட்டத் தொடங்கின. வரலாறு போற்றும் இச் சாதனைக்காக, இவ்விரு விஞ்ஞானிகளும் 1951-ஆம் ஆண்டில் இயற்பியலுக்கான நோபெல் பரிசு பெற்றார்கள்.

இரண்டாம் நிலைப் பொறிகளாக லினாக் எனப்படும் நேரியல் பொறிகள் (*Linac-Linear Accelerators*) பற்றிய செய்திகளைக் கண்டோம். இவை 1925-ஆம் ஆண்டிலேயே கருத்தளவில் உருப் பெற்று, அவ்வப்போது திருத்தியமைக்கப்பெற்று வளர்ந்து வந்திருக் கின்றன. விதரோ, அல்வாரெஸ் முதலிய விஞ்ஞானிகள் இதனை உருவாக்குவதில் சிறந்த பணியாற்றியுள்ளனர் என்பதனைப் பார்த் தோம். இரண்டாம் உலகப்போர் காரணமாகத் திருத்தம்பெற்ற ராடார் சாதனங்கள் இப் பொறிகளின் முன்னேற்றத்திற்குத் துணை செய்தன. அறிவியல் வளர்ச்சியில் பல்துறை வளர்ச்சிகளும் பயன்படும் என்பதனை இங்குக் காண்கிறோம். புரோட்டான் நேரியல் பொறிகளும் எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறிகளும் அமைக்கப் பெற்று, அணு ஆய்விலும் பிற துறைகளிலும் பயன்படுகின்றன. நேரியல் பொறிகள் பேராற்றல் பொறிகளுக்குத் துணைப் பொறிகளாகவும் செயல்படுகின்றன. தவிர, நிறைமிகு அயனிகளை ஆற்றல்பெறச் செய்யும் ஹைலாக் (*HILAC-Heavy Ion Linear Accelerator*) என்னும் பொறியும் உருவாக்கப் பெற்றுள்ளது.

மூன்றும் நிலையில், உயர்ந்து நிற்கும் சிறந்த பொறிகள் சைக்ளோட் ரான்கள் எனப் பெயர் பெற்றன. இப் பொறிகளுக்கு வித்தளித்தவர் பேராசிரியர் லாரென்ஸ் என்று அறிவோம். மாணவப் பருவத்திலேயே சிறந்த சிந்தனையாளர் என்று போற்றப் பெற்றவர் அவர். மின்னூட் டத்துகளை நேர்கோட்டுப் பாதையில் முடுக்கும்போது அதிகமான ஆற்றல் அளிக்க முடியவில்லை என்பதனைக் கண்ட அவருடைய அறிவுள்ளம் அதுபற்றிச் சிந்திக்கலாயிற்று. அவ்வமயம் தற்செயலாக ஜெர்மன் ஆராய்ச்சி இதழ் ஒன்றில், அத் துறைசார்ந்த கட்டுரை ஒன்றைக் காண நேர்ந்தது. சிந்தனை செய்யும் உள்ளம், புதிரினை விளக்கவல்லதொரு கட்டுரை, இவற்றிற்கிடையே மின்னலென ஒரு தொடர்பு நிலவியது. ஒரு கனவு பிறந்தது. அக் கனவே

சைக்ளோட்ரானை அளித்தது. அதன் தத்துவம் 'ஒத்திசைவு முடுக்கம்' (*Resonance Acceleration*) என வழங்கப் பெறுகிறது.

தொடர்ந்து இயங்கிவரும் இரு அமைப்புகளைக் கருதுவோம். அவற்றின் இயக்கங்கள் அலைகளைப் போல் அலையும் தன்மையன. அத்தகைய இயக்கங்களை அவற்றின் அதிர்வெண்களால் குறிக்கலாம். இவ்விரு அமைப்புகளும் ஒரே அதிர்வெண்கள் கொண்டு இயங்குமெனில், அவற்றிற்கிடையே இசைவு அமையும்; இன்றேல் இசைவு ஒழியும். பேசப்படும் பொறியில் அலையும் மின்புலத்திற்கென ஓர் அதிர்வெண் உண்டு. இந்த அலையும் மின்புலத்தில் ஆற்றல் பெறுமாறு வந்து வந்து செல்லும் ஒரு துகளின் இயக்கத்திற்கும், அதிர்வெண் ஒன்று அமையும். இவ்விரு அதிர்வெண்களும் இசையுமானால், இவை ஒத்து இசையும்; துகளும் தவறாது முடுக்கம் பெறும். இதற்குத் துணை செய்வது உரிய முறையில் செயல்படும், ஒரு காந்தப் புலமாகும். இவ்வாறு, அலையும் மின் புலத்தாலும் வழிப்படுத்தும் காந்தப்புலத்தாலும், துகளின் ஆற்றலை வளர்க்கும் பொறி காந்த ஒத்திசைவு முடுக்கி எனப் பெயர் பெற்றது. பேராசிரியர் லாரென்ஸ் அவர்கள் கனவில் தோன்றி, விரைவில் உருவாக்கப்பட்ட இவ் வகையான பொறிகளே கனவுதந்தபொறிகள் என்ற தலைப்பில் பேசப்பட்டன. புதுமை காரணமாகவும் திறமை நோக்கியும் சிறந்த இவ்வகைப் பொறியானது துகள் பொறிகள் பற்றிய காவியத்தில் இனியதொரு திருப்பு மையமாக அமைந்ததை இன்றும் கண்டு வியந்து நிற்கிறோம். பிறகு எழுந்த பொறிகளுக்கெல்லாம் இது தாயகமாக அமைந்ததோடன்றி, அணுபற்றிய இயற்பியலுக்கே உயர்வளிப்பதாகவும் ஆயிற்று. இவ் வகைகளில் உயர்ந்த பணியாற்றிய உத்தமர், அறிவுடைச் செம்மல், அரும் பேராசிரியர் 1939-ஆம் ஆண்டில் நோபெல் பரிசு பெற்றார்.

நான்காம் நிலையில் நின்று நற்பணியாற்றிய பொறிகள் கருத்தூர்ந்த பொறிகள் என்று சுட்டப் பெற்ற சிங்க்ரோசைக்ளோட்ரான்கள் ஆகும். ஐன்ஸ்டீன் என்ற மாமேதையின் கணக்குப்படி எப்பொருளும் ஒளியின் வேகத்தை மீற முடியாது; அதாவது, ஒரு பொருளின் பெரும வேகம் ஒரு செகண்டிற்கு மூன்று லட்சம் கிலோமீட்டர்களாகும். இவ் வேகத்தை நெருங்கும் துகளின், நிறையும் அதிகரிக்கும் என்று இரண்டாம் அத்தியாயத்திலேயே கூறப்பட்டது. ஆகவே, வேகம் காரணமாக நிறைவளர்க்கும் துகள்களை குறிப்பிட்ட அதிர்வெண் கொண்ட அலையும் மின்புலத்துடன் ஒத்திசைவிக்க முடியாது. எனவே, சைக்ளோட்ரான் செயல்படாது. இக்குறை பாட்டினை நீக்கும் வகையில் சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரானாகிய கருத்தூர்ந்த பொறிகள் அமைக்கப் பெற்றன.

ஐந்தாம் நிலையில், அழகுசெய்யும் பொறிகளை எழிலார்ந்த பொறிகள் எனப் பெயரிட்டோம். எலெக்ட்ரான்களை முடுக்கும் இப் பொறிகள் பீட்டாட்ரான்கள் என்பனவாகும். இவ்வகைப் பொறிகளில் முடுக்கம் பெறும் துகள்கள், மாருத ஆர முடைய வட்டப் பாதையில் சென்று சென்று ஆற்றல் ஈட்டுகின்றன. மாறுகின்ற காந்தப்புலம் இப் பொறியில் புதியதொரு வகையில் பயன்படுவதைக் கண்டோம். இதன் உதவியால், அதிக ஆற்றல் வாய்ந்த எலெக்ட்ரான் கற்றையினை உருவாக்கலாம். ஆயினும், கதிர்வீச்சு காரணமாக எலெக்ட்ரான்கள் ஆற்றல் இழக்காமல் காத்துக் கொள்ள வேண்டும். தவிர, துகளின் தடம் பற்றிய பிறழ்ச்சி அலைவுகளைப் பற்றி ஆராய முற்பட்ட கெர்ஸ்ட் என்றும் பெயர்பெற்ற அறிவியலாளர் பீட்டாட்ரான் அலைவுகளைப் பற்றிய அரிய விளக்கங்களைத் தந்திருக்கிருர் என்பதை இரண்டாம் அத்தியாயத் திலேயே குறிப்பிட்டோம்.

அடுத்து ஆரும்நிலையில், சிறந்தவொரு அமைப்பாகச் சிங்க்ரோட்ரான் என்னும் பொறி தோன்றிப் பொலிவு தந்தது. மென்குவிப்புப் பொறிகளுள் இதுவே சிறந்ததாகும். துகளானது, பந்தயப் பாதையில் செல்ல நேர்வதால், பயன்படும் காந்தத்தின் செலவும் குறைகிறது. துகளின் தடநிலைப்பாடு பற்றிய ஆய்வில், மேட்ரிக்ஸ் கணிதமுறை பயன்படுவதைக் கண்டோம். சிங்க் ரோட்ரானில் முடுக்கம் பெறும் துகள்கள் கூட்டமாகப் பந்தயப் பாதையில் இயங்குகின்றன. இக் கூட்டத்தில் பல்லாயிரக் கணக்கான துகள்கள் ஒருங்கே செல்லுகின்றன. இவையெல்லாம் ஒரு குறிப்பிட்ட கணப்பொழுதிலேயே மின்புலத்தை நாடும் என்று சொல்வதற்கில்லை. அவ்வாறு உரிய கணத்தில் தவருது மின்புலத்தை நாடி ஆற்றல் பெறும் ஒரு சில துகள்களை இசைவுறு துகள்கள் என்று கூறினேம். இத்தகு இசைவுறு துகள்களுக்கும், எண்ணிறந்த இசைவுறுத் துகள் களுக்கும், இடையே கலைக்கோணங்களால் வேறுபாடுகள் அமைகின்றன என்றும் கண்டோம். ஆகவே, துகள் கூட்டத்திலுள்ள எல்லாத் துகள்களும் ஒருங்கே ஆற்றல் பெறுவதற்கில்லை என்றும் குறிப்பிட்டோம். இந்தக் குறைபாட்டினை நீக்கும் வகையில் கலைக் கோண நிலைப்பாடு என்றவொரு நுட்பமான கருத்து ஆராயப்பட்டுப் பயன்பட்டது என்பதனையும் பார்த்தோம். இதே கருத்து, நேரியல் பொறியின் வளர்ச்சியின் தொடக்கத்திலேயே சுட்டப்பெற்றது என்பதனையும் இங்கே குறிப்பிடுதல் பொருத்தமாகும். ஆகவே, பொதுவாகத் துகள்பொறிகள் வரலாற்றிலும், சிறப்பாகச் சிங்க்ரோட்ரானைப்பற்றிய கருத்துரையிலும், கலைக்கோண நிலைப்பாடு என்னும் நுட்பம் வாய்ந்த கருத்துச் சிறப்பிடம் பெற்றது என்ப

தையும், இதனால் துகள் முடுக்கும் பொறிகள் ஏற்றம்பெற்றன என்பதனையும் விளக்கினோம். இதன் விளைவாக, முடுக்கம் பெறும் துகளின் ஆற்றல் *BeV* அளவிற்கு உயர்ந்தது என்று கூறவேண்டும். இவ்வாறு சிறந்த பொறியினை ஏற்றமிகு பொறி என அழைத்தோம்.

இறுதியாக, ஏழாம் நிலையில், பேராற்றல் பெற்ற துகள்களை அளிக்கவல்ல சிறப்புப் பொறிகளைப் பற்றிக் கண்டோம். இதுவரையில் பேசப்பட்ட பொறிகள் மென்குவிப்பு (*Weak Focussing*) என்ற தத்துவத்தின் அடிப்படையில் அமைக்கப்பெற்றன. ஆனால், இந்த ஏழாம்நிலைப்பொறிகள் வன்குவிப்பு (*Strong Focussing*) என்ற புதியதொரு தத்துவத்தின்பாற்பட்டன என்பதை அறிவோம். இத் தத்துவம் காந்த அமைப்பில் அரியதொரு முன்னேற்றத்தை அளித்தது என்றும், இப் புதுமையான முறை காரணமாக அடுத்தடுத்த காந்தப் பகுதிகள் மாறுன வாட்டங்கள் பெற்றவை என்றும், இந்த இருவகையான வாட்டம் காரணமாக துகள் முடுக்கத்தில் சிறந்தவொரு முன்னேற்றத்தைக் கண்டார்கள் என்றும், அறிவோம். இதன் விளைவாகப் பேராற்றல் துகள்களைப் பெறமுடியும் ஆதலால், இப் பொறிகளை அரும் பொறிகள் என்று அழைத்தோம். இந்த அரும்பொறியில் துகளின் தடம் பற்றிய தடநிலைப்பாடு, கலைக்கோண நிலைப்பாடு முதலியவைகளுக்கு உரிய நியதிகளையும் ஆய்ந்து கண்டோம். விரிவாகக் காணப்பட்ட இதன் விளக்கவுரையில் கழுத்துக் கச்சைப் படம், திரிவுநிலை ஆற்றல் முதலிய பயனுர்ந்த கருத்துக்களைப் பற்றியும் ஆராய்ந்தோம். இத்தகு சிறந்த தத்துவம், சீரிய ஆய்வுரை, உயர்ந்த அமைப்புகள் இவற்றின் அடிப்படையில் அமைந்த இருவாட்டந்தரு பொறிகள், அல்லது அரும் பொறிகள் மிக்க பேராற்றல் தரவல்லன என்பதையும் கண்டோம். இப் பொறியில் பயன்படுத்தப்பட்ட வன்குவிப்புத் தத்துவத்தைச் செயல்படுத்தி நால்துருவ வில்லை என்றதொரு அமைப்பினையும், அதன் பயனையும் விளக்கினோம். இந்த வன்குவிப்புத் தத்துவத்தின் வளத்தையெல்லாம் முழுதும் பெற்றுேமில்லை என்பதையும், இத் தத்துவம் எதிர்காலத்தில் சிறந்த கருவிகள் அமைப்பதற்குத் துணைசெய்யும் என்பதையும் இங்குக் குறிப்பிட வேண்டும்.

எனவே, இந்நூலில் கண்ட துகள் முடுக்கும் பொறிகள் ஏழு தலைமுறைகளில் வளர்ந்து வந்திருக்கின்றன என்பதையும், ஒவ்வொரு தலைமுறையிலும் ஒவ்வொரு சிறப்பு ஒளிர்கிறது என்பதையும் கண்டோம். இனி, இப் பொறிகளின் வளர்ச்சி, அணுவியல் வளர்ச்சிக்கும், அறிவியல் வளர்ச்சிக்கும் ஆக்கம் அளித்து மனித சமுதாயம் மேன்மை பெறச் செய்துள்ளது என்பதைக் காணலாம்.

10.3. அணுவியற் புதுமைகள்

துகள் முடுக்கும் பொறிகளின் வளர்ச்சியே அணுவியல் வளர்ச்சியாக அமைகிறது என்பதை விளக்க, பல எடுத்துக்காட்டுகள் கூறலாம். இத்துறையில் காணப்பட்ட புதுமைகள் அறிவுக்கு விருந்தாக அமைந்த தோடன்றி சில சிறந்த கண்டுபிடிப்புகளுக்கும் காரணமாயின என்று கூறவேண்டும். அவற்றைப் பற்றிக் கூறுவதற்கு முன்பாக அணுவியல் சார்ந்த சில சிறந்த வளர்ச்சிகளைக் குறிப்பிடுவோம். புதிதுபுதிதாக ஆற்றல் பெறும் வழிகளைக் காண்பதிலேயே மனித சமுதாயம் முன்னேற்றம் காணமுடியும் என்பதை, நீராவிப் பொறிகள் (*Steam Engines*), நெய் ஆவிப் பொறிகள் (*Internal Combustion Engines*) மின்பொறிகள் (*Electrical Generators*) முதலிய கண்டுபிடிப்புகள் விளக்குகின்றன. அந்தக் கண்ணோட்டத்தில் நோக்கும்போது, அணுவியலில் எழுந்தவொரு ஏற்றமிகு கண்டுபிடிப்பு அணுக் கருப்பிளவை (*Nuclear Fission*) என்பதாகும். இந்தப் பிளவையை உருவாக்கி, அணுக்கருவிலிருந்து ஆற்றலைப் பெறுகிறோம். ஆகவே, மிக உயர்ந்த ஆற்றல் தோற்றுவாயினைக் கண்டிருக்கிறோம் என்று கூறுதல் பொருந்தும். இதன் முழுப்பயனும் கிடைக்கும்போது மனித சமுதாயம் வியக்கத்தக்க ஏற்றம் அடையும் என்பதில் ஐயமில்லை.

நியூட்ரான்களின் துணையினால் அணுக்கருவில் பல அரிய மாற்றங்களை உருவாக்கலாம் என்று கண்ட அறிஞர்களின் பெரும் முயற்சியினால் நிலைநாட்டப் பெற்ற சாதனைகள் மிகப் பலவாகும். காட்டாக, புதிய தனிமங்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டதைக் கூறலாம். தனிமங்கள் எல்லாம் அவற்றின் பண்புகளை ஒட்டிவரிசைபடுத்தப்படும் என்பதை ரஷ்ய விஞ்ஞானி மெண்டெலிஃப் என்பவர் சென்ற நூற்றாண்டிலேயே கூறிப் போந்தார். இதனைத் தொடர்ந்து எழுந்த ஆய்வுகள், இந்த நூற்றாண்டில் பல வகையில் தெளிவுதந்தன. அணுக்களில் புரோட்டான்களும், நியூட்ரான்களும், எலெக்ட்ரான்களும் அமைகின்றன என்று தெளிவாயிற்று. அதற்கிடையே மோஸ்லி (*Mos eley*) என்று விஞ்ஞானி எக்ஸ் கதிர் தரும் சிறப்பு நிறமாலைகளை ஆராய்ந்து அணுப்புறத்தில் அமையும் எலெக்ட்ரான்களின் சிறப்பையும், அணுக்கருவில் அமையும் புரோட்டான்களின் சிறப்பையும் விளக்கினார். இத்தகைய அரிய ஆய்வுகளின் விளைவாக ஹைடிரஜன் முதல் யுரேனியம் ஈறாக அமைந்த 92 தனிமங்களும் முறையாக வரிசைப்படுத்தப்பட்டன. இச் சீரிய ஆய்வில் 43, 61, 85, 87 ஆகிய அணு எண்கள் கொண்ட தனிமங்கள் காணப்பெறவில்லை. விஞ்ஞானிகளின் அயராத உழைப்பினால், டெக்னீஷியம் (*Technitium*), புரோமீத்தியம் (*Promethium*), ஆஸ்டட்டீன் (*Astatine*), ஃபிரான்சியம் (*Francium*) என்னும் பெயர் கொண்ட அந் நான்கு

தனிமங்களும் கண்டுபிடிக்கப்பட்டு முறையே மேற்கூறப்பட்ட அணு எண்களுக்கு உரியனவாக அமைந்தன. தனிமங்கள் பற்றிய மடக்குநிலை வரிசை (*Periodic Table Of Elements*) துகள் பொறிகள் துணையினால் வியத்தகு வளர்ச்சி பெற்றதை இனிக் காணலாம்.

இயற்கையில் 92 தனிமங்களே காணப்படுகின்றன என்ற போதிலும், அதனைவிட உயர்ந்த அணுஎண் கொண்ட தனிமங்கள் கிடையா என்று சொல்லுவதற்கில்லை. உலகு தோன்றிய காலத்தில் அத்தகைய தனிமங்கள் இருந்திருக்கலாம் என்றும் கூறப்படுகின்றது. அத்தகைய தனிமங்கள் விரைவில் சிதைந்து குறைந்த அணு எண் கொண்ட தனிமங்களாக மாறிவிடுகின்றன என்பது ஆய்வாளர்கள் கண்ட கருத்தாகும். தவிர, காஸ்மிக் கதிர்கள் தொடர்பால் அத்தகைய தனிமங்கள் இன்றும் ஒரோவழி உருவாதல் சாலும். இவற்றையெல்லாம் நோக்கும்போது யுரேனியத்திற்கும் அப்பாற் பட்ட தனிமங்கள் செயற்கை முறையில் உருவாக்கப்பெறுதல் விந்தையன்று என அறிகிறோம்.

இம் முயற்சியில் தொடர்ந்து ஈடுபட்ட பல அறிஞர்கள் யுரேனியம் ஊர்ந்த தனிமங்களைக் (*Transuranic Elements*) கண்டுபிடித்திருக்கி றார்கள். இம் முயற்சியில் துகள்முடுக்கும் பொறிகள் பெரும்பணி ஆற்றி யிருக்கின்றன. இவ்வகையில் பெரும்பணியாற்றிய சைக்ளோட்ரான், பெர்க்கிலி சைக்ளோட்ரான் (*Berkley Cyclotron*) எனப் பெயர் பெற்ற பொறியாகும். இதன் துணையினாலேயே ஆறு யுரேனியம் ஊர்ந்த தனிமங்கள் கண்டுபிடிக்கப் பட்டுள்ளன. அவை நெப்டூனியம் (93), புளூட்டோனியம் (94), கியூரியம் (96), பெர்க்கிலியம் (97), கலிஃபோர்னியம் (98), மெண்டெலீவியம் (101) என்று பெயரிடப் பட்டுள்ளன. துகள்முடுக்கும் பொறிகளின் சிறப்பினை இச் சாதனைகள் மூலம் நன்கு உணரலாம். மேலும் 102—ஆவது தனிமமாகிய நோபெலியத்தை உருவாக்குவதில் ஹைலாக் என்னும் நேரியல்பொறி பெரிதும் துணை செய்தது. இவ்வாறு துகள் முடுக்கும் பொறிகளின் துணையினாலும் அணு உலைகளின் (*Nuclear Reactors*) துணையினாலும் இதுவரையில் 12 யுரேனியமூர்ந்த தனிமங்கள் உருவாக்கப்பட்டிருக் கின்றன. இதனினும் உயர்ந்த தனிமங்களை உருவாக்குவதில் கொள் கையளவில் குறையேதுமில்லை என்றாலும், அத் தனிமங்கள் எல்லாம் அதிவிரைவில் உருக்குலைந்து விடுவதை மனிதன் கண்டு வியந்து நிற்கிறான். இயற்கையுடன் போட்டியிடுவதில் மனிதன் ஓர் எல்லையில் நிற்கிறான் போலும்!

அணுவியல் வளர்ச்சியில் இந்த நூற்றாண்டு காட்டும் பல அரிய சாதனைகளுக்குச் சிறந்த ஆய்வரங்கச் சோதனைகளும் துணை செய்கின்றன என்பது யாவரும் அறிந்த ஒன்றாகும். ஆயினும், இவ்

ஆய்வரங்கச் சோதனைகளுக்கெல்லாம் துணையாகவும் வழிகாட்டியாகவும் அமைவன பேரறிஞர்களின் அறிவுரைகளாகும். இவ்வகையில் ஐன்ஸ்டீன் பெருமகனார் அளித்த சார்பியல் கொள்கையின் மாண்பினை ஆங்காங்கு கண்டோம். அதைப் போலவே பல உண்மைகள் விளக்க உரைகள் வாயிலாக அவ்வப்பொழுது குவாண்ட விசைஇயல் *(Quantum Mechanics)* அணுவியலை வளர்த்திருக்கிறது என்பதனைக் காண்கிறோம். அணுத் துகள்கள் அருமைப்பாடு உடையவை என்பதனை அறிந்த நாம் அவற்றின் இயக்கத்தை விளக்கவல்லது குவாண்ட விசை இயல் என்பது கண்டு இப் புதிய அறிவுத் துறையின் சிறப்பினை உணர்கிறோம். துகள்களெல்லாம் அலைப்பண்பு உடையன என்ற சிறந்த கருத்து லூயி-தி-பிராய் *(Louis De Broglie)* என்ற அறிஞரால் தரப்பட்டது. இதன் அடிப்படையில் தோன்றிய குவாண்ட விசை இயல் ஷ்ரோடிங்கர் *(Schroedinger)*, ஐஸென்பெர்க் *(Heisenberg)*, மேக்ஸ் பார்ன் *(Max Born)* முதலிய பேரறிஞர்களால் வளர்க்கப்படுவதாயிற்று. இவ் வளர்ச்சியினை முழுமைப்படுத்தும் வகையில் டிராக் *(Dirac)* என்னும் தலைசிறந்த இயற்பியலாளர் கண்ட அறவுரையானது அறிஞர்களுக்கு இன்றும் என்றும் பெருவிருந்தாய் அமையும். ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டில், சார்பியல் கொள்கையை இணைக்கப்புக்க டிராக், வியக்கத்தக்க விளைவினைத் தம்முடையத் சிந்தனைத் திறத்தினால் பெற்றார். கணக்கியலிலும் வல்லுநரான இப் பெருமகன் கண்ட இயற்கையின் தனிச் சிறப்பினை ஓரளவு எழுதுதல் கூடுமாயினும், அதுபற்றி ஆய்வோருக்கே அதன் சிறப்பு மிகத் தெளிவாகும். அவர் கண்ட காட்சி இயற்கையின் ஒரு முழுமைக் காட்சியாகும். எலெக்ட்ரான் துகள் பற்றிய சீரிய விளக்கம் தந்த அப் பெருமகன், அத் துகளின் ஆன்ட்டி துகளை *(Anti Particle)* தன்னுடைய ஆய்வுரையின் வாயிலாக முதலில் கண்டு கூறினார். இது ஒரு மாபெரும் சாதனையாகும். இயற்கையின் அறம் பற்றிய சிறந்த சில அறவுரைகளுள் இதுவும் ஒன்றாகும். துகள்கள் பற்றிய அறிவுத்துறையில் இவ்வுரை சிறந்த வழிகாட்டியாக அமைந்தது. ஏன், இன்றும் இந்த அறவுரை சிறந்த வழிகாட்டியாக விளங்குவதுடன், எதிர்காலத்திலும் அவ்வாறே இலங்கும் என்பதில் ஐயமில்லை. ஆகவே, டிராக் தந்த அறவுரைப்படி துகளொன்று இயற்கையில் காணப்படுமானால் அதற்கென்றே அமைந்த ஆன்ட்டி துகளும் இருக்கவேண்டும். இந்தத் துகளும், ஆன்ட்டி துகளும் பல பண்புகளின் அடிப்படையில் ஒற்றுமைப்பட்டிருப்பினும் ஒருசில பண்புகள் காரணமாக வேற்றுமைப்பட்டு நிற்கும்.

எலெக்ட்ரானின் ஆன்ட்டி துகள் பாஸிட்ரான் *(Positron)* என்று அழைக்கப்படுகின்றது. இயற்கையில் அரிதே காணப்பெறும் இத் துகள், காஸ்மிக் கதிர்கள் பற்றிய ஆய்வில் ஆண்டெர்ஸென்

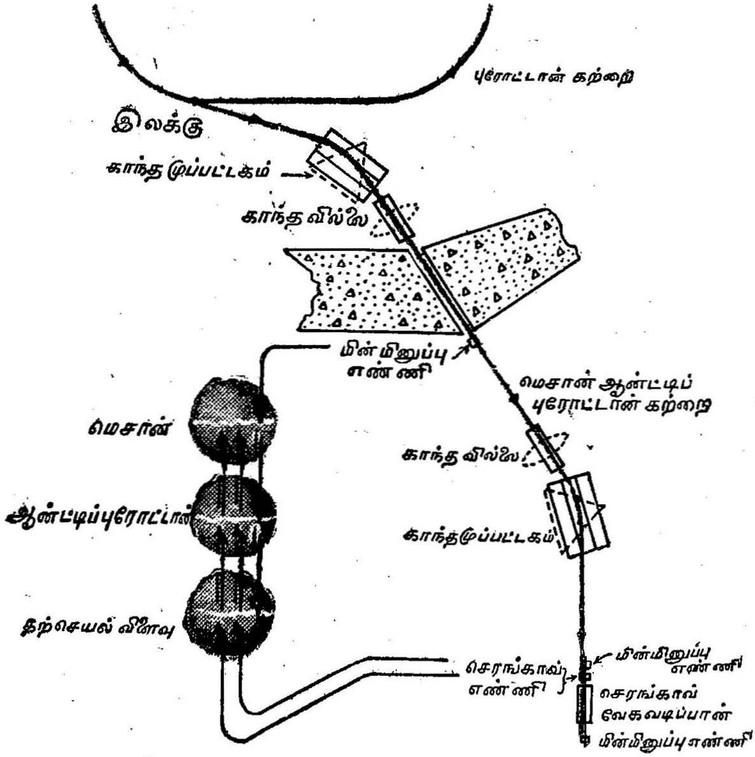
(*Anderson*) என்பவரால் காணப்பெற்றது. அதன்பிறகு அணுபற்றிய பல ஆய்வுகளிலும் இத் துகள் காணப்பெற்று இன்று நிலைபெற்று விட்டது. துகள், ஆன்ட்டி துகள் பற்றியதொரு எடுத்துக்காட்டினைப் பற்றி இதுவரையில் ஒருவாறு கூறினோம். இதைப்போலவே சிறப்பு வாய்ந்த இன்னொரு எடுத்துக்காட்டினையும் காணலாம்.

அணுக்கருவின் சிறப்பு அங்கமாகப் புரோட்டான் துகள் அமைவதை நெடுநாட்களாகவே அறிவோம். இந்த அடிப்படைத் துகள், நேர்மின்னூட்டம் கொண்டது. இதன் நிறை $1 \cdot 6724 \times 10^{-24}$ கிராம் ஆகும். இதற்கும் ஒரு ஆன்ட்டி துகள் இருக்கவேண்டுமல்லவா? அத்தகைய ஆன்ட்டி துகளைப் பற்றிய ஆய்வு, டிராக் தெளிவுரைக்கு 25 ஆண்டுகள் சென்ற பிறகே வெற்றி பெற்றது. இதன் பெயர் ஆன்ட்டி புரோட்டான் (*Anti Proton*) என்பதாகும். புரோட்டானும் ஆன்ட்டி புரோட்டானும், ஒன்றுக்கொன்று ஆன்ட்டி துகள்களாகும். இவ் விரு துகள்களும் நிறை, தற் சுழற்சி (*Spin*), பிறப்புநிலை, வாழ்வுநிலை, மறைவுநிலை, *i*-சுழற்சி (*Isospin*), மின்னூட்ட அளவு ஆகிய பண்புகளால் ஒற்றுமைப்பட்டு இருந்த போதிலும், மின்னூட்டத்தின் தன்மையினால் மாறுபடும். அதாவது புரோட்டானின் மின்னூட்டம் $+4 \cdot 8028 \times 10^{-10}$ *e.s.u.* ஆகவும், ஆன்ட்டி புரோட்டானின் மின்னூட்டம் $-4 \cdot 8028 \times 10^{-10}$ *e.s.u* ஆகவும் அமைகின்றன.

இனி, இந்த ஆன்ட்டி புரோட்டான் எனப் பெயரிய துகள் எவ்வாறு கண்டுபிடிக்கப்பட்டது என்பதைக் காணும்போது, துகள் முடுக்கும் பொறிகளின் சேவையானது ஈடில்லாச் சேவையாகிறது என்பதை உணரலாம். இத் துகளைக் கண்டுபிடிப்பதற்கெனவே பீவாட்ரான் (*Bevatron*) என்னும் சிறப்புப் பெயர்பெற்ற சிங்க்ரோட்ரான் அமைக்கப் பெற்றது என்று கூறுதல் பொருந்தும். இந்த பீவாட்ரான் துணையினால் ஆன்ட்டி புரோட்டான் எனப்படும் துகள் எவ்வாறு கண்டுபிடிக்கப் பட்டது என்பதுபற்றிச் சுருக்கமாகக் கூறுவோம்.

ஆண்ட்டி புரோட்டான் கண்டுபிடிக்கப்பட வேண்டுமானால், அதற்குரிய புரோட்டான் கற்றை 6 *BeV* ஆற்றல் கொண்டிருக்க வேண்டும் என்பது ஆய்வாளர்களின் மதிப்பீடாக அமைந்தது. அத்தகைய கற்றையினைத்தான் கலிஃபோர்னியா பல்கலைக் கழகத்தில் அமைக்கப்பெற்ற பீவாட்ரான் பொறி அளித்தது. இக் கற்றையானது படத்தில் காட்டியபடி செப்புத் தகட்டினாலான இலக்கின் மீது செயல்படும். ஆங்குள்ள அணுக்கருக்களோடு தொடர்பு கொண்ட இந்தப் புரோட்டான்கள் பல்லாயிரக் கணக்கான துகள்களை அளிக்கின்றன. அவற்றுள் ஒரு சிலவே நாம் எதிர்பார்க்கும் ஆன்ட்டி

புரோட்டான்கள் ஆகும். 40,000 மெசான்களுக்கு ஒன்று வீதம் இந்த ஆன்ட்டி புரோட்டான்கள் வெளிவருகின்றன. மாபெரும் துகள் கூட்டத்தினூடே வரும் ஒரு சில ஆன்ட்டி புரோட்டான்களைக் கண்டுணர்வது அருமையிலும் அருமையாகும். எனவே, இச் சோதனையில் ஈடுபட்ட ஆய்வாளர்களின் பணி சிறப்பு வாய்ந்தது எனக் கூறலாம்.



படம் 10.1 ஆன்ட்டி புரோட்டான் கண்டுபிடிப்பு

இலக்கிலிருந்து வெளிவரும் துகள் கற்றையானது காந்த முப்பட்டகம் ஒன்றின் வழியே செல்லும். இந்தக் காந்த முப்பட்டகம் π மெசான்கள் ஆன்ட்டி புரோட்டான்கள் அடங்கிய ஒரே உந்தமுள்ள துகள் கற்றையைத் தரும். இந்தக் கற்றை நால்துருவக் காந்த வில்லையொன்றின் துணையினால் ஒருமுகப்பட்டு வரும். இவ்வாறு ஒருமுகப்படுத்தப்பட்ட கற்றையின் வருகையைக் கூறுவதற்கு மின்மினுப்பு எண்ணி (*Scintillation Counter*) ஒன்று உள்ளது. துகளானது வருகை தந்தவுடன் எண்ணியிலுள்ள ஒளிரும் பொருள்கள் ஒளிர்வுற்று ஒளிதரும். இந்த ஒளித்துடிப்புகள்

மின்துடிப்புகளாக மாற்றப்பட்டு எலெக்ட்ரான் கதிர்க்குழாயின் ஒளிர்திரையில் செய்திகூறும். இதனைக் கண்டுணர்ந்து மின்மினுப்பு எண்ணியில் துகள் வந்துற்றது என அறியலாம்.

இந்த மின்மினுப்பு எண்ணியில் புகுந்த துகள் கற்றை வெளி வந்த பிறகு, குறிப்பிட்டதொரு தூரத்தைக் குறிப்பிட்டதொரு நேரத்தில் கடந்து, இரண்டாவதாக அமையப்பெறும் மற்றுமொரு மின்மினுப்பு எண்ணியின் வாயிலாகச் செய்தி கூறும். இவ்விரு எண்ணிகளுக்கும் இடையே அமைந்த தூரம் 12 மீட்டராகும். இந்த 12 மீட்டர் தூரத்தை ஆன்ட்டி புரோட்டான்கள் கடக்கும் நேரம் மிகமிகக் குறுகியதாகும்.

இந்தக் குறுகிய கால அளவினை அளப்பதற்குக் காலம் பற்றிய ஒரு சிற்றலகினைப் பயன்படுத்துகிறோம். ஒரு செகண்டு தூரத்தை 10 லட்சம் பாகங்களாகப் பிரித்துவரும் காலப்பகுதியை 1 மைக்ரோ செகண்டு (*Micro Second*) என்று கூறுகிறோம். இந்த மைக்ரோ செகண்டு சிறுபொழுதை மீண்டும் ஆயிரம் பாகங்களாகப் பிரித்துக் கிடைப்பதை 1 நாநோ செகண்டு (*Nano Second*) என்றும் கூறுகிறோம். ஆகவே, ஒரு செகண்டு காலப் பொழுதானது 100 கோடி பாகங்களாகப் பிரித்துக் கிடைப்பது 1 நாநோ செகண்டு எனப்படும் மீச்சிறு பொழுதாகும். எனவே, 12 மீட்டர்தூரத்தை ஆன்ட்டிப் புரோட்டான்கள் 51 நாநோ செகண்டுகளில் கடக்கலாகும்.

முன்னர் கூறிய இரு எண்ணிகளையும் தொடர்புபடுத்தி ஒத்தியல் கணிப்பான் (*Coincidence Counter*) ஒன்றை அமைக்கிறோம். இந்த ஒத்தியல் கணிப்பானின் துணையினால் துகள் பன்னிரண்டு மீட்டர் தூரத்தைக் கடப்பதற்குத் தேவையான காலம் அறியப்பட்டு, துகளின் வேகம் கணிக்கப் பெறும்.

கற்றையில் இருவகைத் துகள்கள் வருகின்றன எனக் கண்டோம். பெரும்பான்மையானவை மெசான்கள் என்றும், ஒருசிலவே ஆன்ட்டி புரோட்டான்கள் எனவும் கூறினோம். மெசான்களும், புரோட்டான்களும் உந்தத்தால் ஒன்றுபட்டன வாயினும், நிறையால் வேறுபட்டனவாகும். மெசானின் நிறை, ஆன்ட்டி புரோட்டானின் நிறையைவிட 6·5 மடங்கு சிறியதாகும். எனவே, மெசான்கள் ஒளியின் வேகத்தை ஒத்த வேகத்தில் செல்லவும், ஆன்ட்டி புரோட்டான்கள் 78% ஒளிவேகத்தில் செல்வதாகவும் அமைகின்றன. இந்த ஆன்ட்டி புரோட்டான்களின் வருகையை மட்டும் தெரிவிப்பதற்குப் பயன்படும் கருவி, செரென்காவ் எண்ணி (*Cerenkov Counter*) எனப் பெயர் பெற்றது. இரஷ்ய நாட்டு விஞ்ஞானியான செரென்காவ் இதுபற்றிய ஆய்வுக்காக நோபெல் பரிசு பெற்றார்

என்று குறிப்பிடுவதும் ஈண்டு பொருத்தமாகும். ஆகவே, இந்தச் செரென்காவ் எண்ணி கொண்டு ஆன்ட்டி புரோட்டான்கள் வருகின்றன என்பதனை அறியலாம்.

செரென்காவ் கதிர்வீச்சின் *(Cerenkov Radiation)* அடிப் படையில் அமையும் இன்னொரு கருவியும் இங்கு பயன்படுகிறது. இதன் பெயர் செரென்காவ் வேகவடிப்பான் *(Cerenkov Velocity Selection Filter)* என்பதாகும். இதனைப் பயன்படுத்தி, சோதனைக் காலத்தில் ஆன்ட்டி புரோட்டான்களைத் தவிரப் பிற துகள்களாகிய மெசான்கள் வருகை புரியவில்லை என்பதனையும் உறுதி செய்து கொள்ளலாம்.

இறுதியாக, இன்னுமொரு மின்மினுப்பு எண்ணியானது இக் கற்றையின் பாதையில் அமைக்கப்பெறும். இதுவரையில் கூறப்பட்ட பல்வேறுவகையான நிகழ்ச்சிகளுக்கு உட்பட்டு வெளி வரும் ஆன்ட்டி புரோட்டான்களை இறுதியாக வரவேற்று கட்டியங் கூறுவது இக் கருவியாகும்.

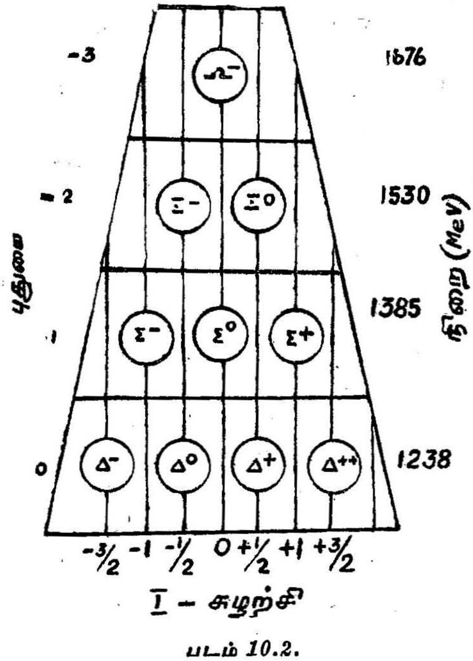
இவ்வாறு ஆன்ட்டி புரோட்டானின் உண்மையும், நிறையும், வேகமும், மின்னூட்டமும், அறிஞர் போற்றும் வகையில் பீவாட்ரான் பொறியின் துணையினால் தெளிவுசெய்யப் பெற்றன. இவ்வரிய ஆய்வு 1955-ஆம் ஆண்டில் சேம்பர்லேன் *(Chamberlain)*, செக்ரே *(Segre)* முதலிய பேராய்வாளர்களினால் திட்டமிடப்பட்டுச் செயலாற்றப் பெற்றது.

எலெக்ட்ரான் - பாஸிட்ரான், புரோட்டான் - ஆன்ட்டி புரோட்டான் ஆகிய ஆன்ட்டி துகள்கள் மட்டுமே டிராக் கூறிய இயற்கைபற்றிய அறவுரைக்கு அரண் செய்வதாகக் கருதவேண்டா. நியூட்ரான் ஆன்ட்டிநியூட்ரான் ஆகிய இரு ஆன்ட்டி துகள்களும் இயற்கையிலேயே கிடைப்பதை அணுவியல் நிலைநாட்டி இருக்கிறது. இவை யாவற்றிற்கும் மேலாகப் பீட்டாச் சிதைவின் போது *(Beta Decay)* பிறக்கும் நியூட்ரினோ *(Neutrino)* எனும் துகளும் அறிவியல் வரலாற்றிலேயே புதியதொரு எழுச்சியை உருவாக்கியது. இத் துகளின் ஆன்ட்டி துகளான, ஆன்ட்டி நியூட்ரினோவும் *(Anti-Neutrino)* அறியப்பட்டிருக்கிறது.

இதுகாறும் அமைக்கப்பெற்ற துகள் பொறிகளுள் தலைசிறந்து விளங்குவது இருவாட்டந்தரு பொறி என்பதனை அறிவோம். இந்த அரும்பொறியின் அருமையான சாதனையொன்றை இனிக்காண்போம். இப் பொறியின் மூலமாகப் புதியதொரு துகள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டு, அறிவியல் வரலாற்றில் துகள்கள் பற்றிய அறிவு தெளிவு பெற்றது. இத்தகு சிறப்புக்குரிய ஒமேகா மைனஸ்(Ω^-) என்னும் துகள் பற்றிய செய்திகள் நம் அறிவுக்கு நல்விருந்தாய் அமைகின்றன.

1960-ஆம் ஆண்டு அளவில் முப்பது துகள்கள் இயற்கையில் இருப்பதை அறிஞர்கள் கண்டு மகிழ்ந்து போற்றினர்கள். ஆயினும், இம் மகிழ்ச்சி குறைபாடு உடையது என்னுமாப்போல அடுத்த சில ஆண்டுகளிலேயே அறுபதுக்கும் மேற்பட்ட துகள்கள் தலைகாட்டலாயின. புதிதாகத் தோன்றிய இந்தத் துகள்களை வகைப்படுத்த முற்பட்ட கெல்மான் (*Gelmann*) என்னும் பேராசிரியர் இனியதொரு காட்சி கண்டார். பல்வேறுபட்ட துகள்களை வகைப்படுத்தும் போது குழுநிலைக் கொள்கை (*Group Theory*) என்னும் கணிதக் கொள்கை துணைசெய்தது. சில துகள்களை எண்மக் கோட்பாடு (*EightFold Way*) என்றதொரு அமைப்பில் இணைக்கலாம் என்பது அவர் கருத்து. இதனைச் சுருக்கமாக *SU* (3) அமைப்பு (*Special Unitary Group For Arrays of Size* 3×3) என்று, குழுநிலைக் கொள்கை கூறும்.

SU (3) அமைப்பின்படி பத்துத் துகள்கள் சேர்ந்து ஒரு கோபுரம் அமையும். இக் கோபுரம் வெவ்வேறு பண்புகளின் அடிப்படையில் உருவாகும் நான்கு படிகள் கொண்டது. முதற்படியில் நான்கு துகள்கள், இரண்டாம்படியில் மூன்று துகள்கள், மூன்றும் படியில்



படம் 10.2.
ஒமேகா மைனஸ் துகள்

இரண்டு துகள்கள். இறுதிப் படியில் மகுடம்போல் ஒரேயொரு துகள். அதுவே கெல்மான் கண்ட காட்சியாகும். ஒவ்வொரு படியிலும் ஒரே

நிறையுடைய துகள்கள் அமைந்துள்ளன. ஆனால், ஒரு படியில் அமைந்த எல்லாத்துகள்களுமே ஒரே மாதிரி மின்னூட்டம் உடையன அல்ல (படம் 10.2). Δ^-, Δ^0 Δ^+, Δ^{++} என்ற நான்கு துகள்கள், Σ^-, Σ^0, Σ^+ என்ற மூன்று துகள்கள், Ξ^-, Ξ^0 என்ற இரண்டு துகள்கள் முறையே முதற் படி, இரண்டாம்படி, மூன்றாம் படிகளில் அழகுற அமைவதைக் கண்ட அவர் களிப்பெய்தினர். ஆயினும் மகுடமென அமையும் Ω^- என்னும் பெரிய பத்தாவது துகள் காணப் பெற வில்லை. கொள்கை தூய்மையானதாக இருக்குமானால் அதற்குரிய காட்சி இன்று இல்லாவிட்டாலும் இன்னொருநாள் அமைவதைக் காண்கிறோம் அல்லவா? அதே நிலையில்தான் அதுகாறும் காணப்பெறாத Ω^- என்னும் துகள்பற்றிய வேட்டை துவங்கிற்று. வேட்டைக் களங்கள் அணுக்கருவியல் ஆய்வரங்கங்கள். வென்றது, புரூக்ஹேவன் ஆய்வரங்கம். தானே தந்தது A. G. சிங்க்ரோட்ரான் பொறி.

இந்த அரும் பொறியானது பேராற்றல் புரோட்டான்களைத் தரவல்லது என்பதனை அறிவோம். இப் புரோட்டான்களைக் கொண்டு ஏவல் செய்யவல்ல மெசான்களை உருவாக்கினர்கள். இவை K^- மெசான்கள் எனப்படும். வெப்ஸ்டர் (*Webster*) என்னும் பெயரிய ஆய்வாளரின் அருமுயற்சியினால் இந்த π மெசான்கள் 1/600 அங்குல வாய் வழியாகத் தூய்மையான கற்றையாகக் கிடைத்தன. இந்த மெசான்கள் சிறப்பாக அமைக்கப்பட்ட குமிழ்கலத்தின் (*Bubble Chamber*) உட்சென்று அருஞ்செயல் புரிவனவாகும். கலத்தினுள் அமைந்த திரவ ஹைடிரஜன், புரோட்டான்களைக் கொண்டு மெசான்களை வரவேற்கும். K^- துகளும், p துகளும் இணைந்து,

$$K^- + p \longrightarrow K^0 + K^+ + \Omega^-$$

என்ற வாய்பாட்டின்படி, K^0, K^+, Ω^- ஆகிய துகள்களுக்கு வழிசெய்யும். இவற்றுள் K^0 என்பது மின்னிலாத் துகள். இது தன் நலிவால் தன்னைக் காட்டி விடும். K^+ என்பது மின்னூட்டம் கொண்ட துகள். அதற்கென அமையும் அதன் தடங்கொண்டு அதனைக் கண்டு கொள்ளலாம். ஆனால் மூன்றாவதாகிய Ω^- துகளைக் காண்பது எப்படி?

$$\Omega^- \longrightarrow \pi^- + \Xi^0$$

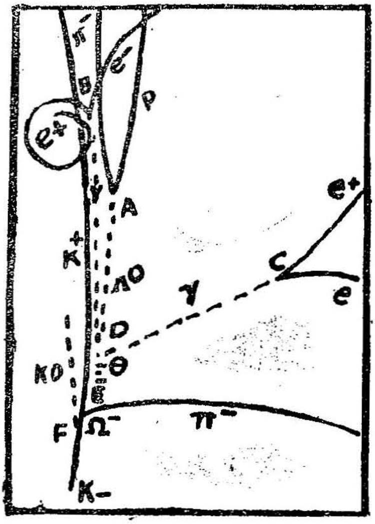
என்றவாறு π^-, Ξ^0 ஆகிய துகள்களாக Ω^- உருவெடுக்கும். இவற்றிற்கென இருவேறு தடங்கள் அமையும். அடுத்து, Ξ^0 என்னும் துகள்

$$\Xi^0 \longrightarrow 2e^- + 2e^+ + \Lambda^0$$

என்றவாறு ஐந்து துகள்களைத் தரும். மேலும், Λ^0 என்னும் துகள்

$$\Lambda^0 \longrightarrow \pi^- + p$$

என்ற வகையில் மாறும், π^- துகளும் p துகளும் காட்சியளிக்கும். ஆகவே, தன்னைக் காட்டிக் கொடுக்காத Ω^- துகள் π^-; $2e^-$, $2e^+$; π^-, p என்ற என்றவாறு ஏழு துகள்களைத் தந்து மறைந்து விடுகிறது. இவ்வாறு கெல்மான் அவர்கள் அறிவால் கண்ட காட்சி



படம் 10.3

Ω^- துகளின் சிதைவு

மெய்ப்பாடு பெற்றது. கருத்து வழிகாட்ட, கருவி துணை செய்ய, அணுக்கருவியல் கலைஞர்கள் கண்ணயராது 30,50,000 ஒளிப்படங்கள் நாற்பத்தைந்து நாட்களில் உருவாக்கினர்கள் எனில், அவர்களுடைய உழைப்பின் திறத்தை என்னென்று சொல்வது?

10.4. பல்துறைப் பயன்கள்

அணுவியலில் பல புதுமைக் கருத்துக்களைப் பற்றி ஆய்வதற்குத் துணைநின்ற துகள் முடுக்கும் பொறிகள், மனித வாழ்வின் வளத்திற்கும் துணை செய்வதைக் காணலாம். மருத்துவம், வேளாண்மை, தொழிலியல் போன்ற பல துறைகளில் இப்பொறிகள் அரும்பணி யாற்றுகின்றன.

புற்றுநோய் சிகிச்சையில் X கதிர்கள் முக்கிய இடம் வகிக்கின்றன. சாதாரண முறைகளில் எக்ஸ் கதிர்கள் பெறும் ஆற்றலைவிடப் பீட்டாட்ரான் துணையினுல் பெறக்கூடிய எக்ஸ் கதிர்கள் மிகவும் அதிகமான ஆற்றல் பெறுவதாகும். இத்தகைய பேராற்றல் வாய்ந்த எக்ஸ் கதிர்கள் பலவகைகளிலும் இன்று பயன்படுகின்றன.

புற்று நோயால் நலிந்த பகுதியினை X கதிர்வீச்சுக்கு உள்ளாக்குவதன் மூலம், பாதிக்கப்பட்ட செல்களுடன் போராடி எக்ஸ் கதிர்கள் வெற்றியடையும். இவ்வித சிகிச்சை அளிக்கும்போது, நோயால் பாதிக்கப்படாத பகுதி X கதிர்களின் வீச்சுக்கு உள்ளாகாமல் காக்க வேண்டியுள்ளது. இதை நோக்க எலெக்ட்ரான் கற்றை, Xகதிரைவிடச் சிறந்ததாக அமைகிறது. பீட்டாட்ரான் பொறிகள், நேரியல் முடுக்கிகள் ஆகியவற்றிலிருந்து வெளிவரும் எலெக்ட்ரான் கற்றையை நேரடியாகவே சிகிச்சைக்குப் பயன்படுத்தலாம். புற்று நோயால் நலிந்த பகுதியின் அளவையும், ஆழத்தையும் தீர்மானித்தபின் அதற்கேற்றவாறு ஆற்றலுடைய எலெக்ட்ரான் கற்றையைப் பொறியிலிருந்து பெற்று சிகிச்சை அளிக்கலாம். இவ்விதம் சிகிச்சை அளிப்பதனுல் நோயினுல் நலிவுற்ற பகுதி மட்டும் கதிர்வீச்சுக்கு உள்ளாகும்படியும், நலிவில்லாப் பகுதி கதிர்வீச்சுக்கு உள்ளாகாதவாறும் செய்வது எளிது.

தவிர, உணவுப் பொருள்களைப் பாதுகாக்க கதிர்வீச்சின் பங்கைக் காணும்போது, முடுக்கும் பொறிகளின் பயன் இன்னும் தெளிவாகும். உணவுப் பொருள்களைக் கெடச் செய்யும் பாக்டீரியாக்களையும், தானியங்களைப் பாழாக்கும் பூச்சிகளையும் ஒழித்து நற்பயன் அடையக் கதிர்வீச்சுகள் துணை நிற்கும் என்று அறியும்போது விந்தையாக இருக்கும். உணவுப் பொருள்களின் நலம் கெடாமல் பாதுகாக்க, பதனிடுதல் (Canning), குளிர்பதனப்பெட்டி போன்ற வழிவகைகள் இருக்க, இந்தக் கதிர்வீச்சு முறையைக் கையாள வேண்டியது தேவை தானு எனத் தோன்றும். இவ்விரு முறைகளும் எல்லா உணவுப் பொருள்களுக்கும் ஏற்றவை எனக் கூறிவிட முடியாது. ஓர் உணவுப் பொருளைக் காக்கின்றேமெனில் அதன் சுவையும் கெடாமல் இருக்க வேண்டுமல்லவா? எனவே, குறைந்த செலவில், அறை வெப்ப நிலையில், பொருளின் சுவையும் தன்மையும் கெடாமல் காத்து நலம் பயக்கும் முறையொன்றைச் சிந்திக்க வேண்டியுள்ளது. எலெக்ட்ரான் நேரியல் பொறி, பீட்டாட்ரான் போன்ற பொறிகளில் இருந்து கிடைக்கின்ற எலெக்ட்ரான் கற்றையின் துணையினுல் கதிர்வீச்சுக்கு உள்ளாக்கிப் பாதுகாத்தல் எளிதாவதுடன், நலம் பயப்பதாகவும் உள்ளது எனலாம். உருளைக்கிழங்கை, இத்தகு கதிர்வீச்சிற்கு உள்ளாக்குவதன் மூலம் பதினைந்து மாதங்கள் வரை சுருங்காமல் வதங்காமல் காக்க முடியும்.

மேலும் பென்சிலின், ஸ்ட்ரெப்டோமைஸின் (*Streptomycin*) போன்ற மருந்துப் பொருள்களின் தூய்மையைக் காக்கவும் கதிர்வீச்சுப் பயன்படுத்தப் பெறுகின்றது.

இவ்வாறு மருத்துவத்துறை, உணவுத்துறை முதலிய துறைகளில் பணியாற்றும் முடுக்கும் பொறிகள் தொழிலியலிலும் பல நல்ல

தொண்டுகளைப் புரிகின்றன. பாலித்திலீன் (*Polyethelene*) பொருள்களை பீட்டாக் கதிர்களின் கதிர்வீச்சுக்கு உள்ளாக்குவதன் மூலம் அவற்றின் வலுவை அதிகமாக்குவதுடன், எளிதாக உருகாமலும் செய்யக் கூடும். சாதாரண முறைகளில் உருவாக்க முடியாத வண்ணந்தரு பொருட்களை (*Dyes*) உற்பத்தி செய்வதில் கதிர்வீச்சின் பங்கு ஆராயப்பட்டு வருகின்றது. பிளாஸ்டிக் கம்பிகளில் வெப்பத்தை எதிர்க்கும் இயல்பை உருவாக்க அணுக்கதிர் வீச்சைப் பயன்படுத்தவும் முயன்று வருகின்றனர். மேலும், இக் கதிர்வீச்சின் மூலம் கண்ணாடிப் பொருள்கள் எளிதாக உடைந்து போகாமலும், வெப்பத்தால் பாதிக்கப்படாமலும் செய்ய ஆய்வுகள் தொடர்கின்றன.

10.5. இனி வரும் பொறிகள்

துகள் பொறிகளில் முடுக்கம் பெற்று ஆற்றல் ஈட்டிய துகள் கற்றைகளைக் கொண்டு பலவகையான ஆய்வுகள் செய்யப்பட்டன. பெரும்பாலான ஆய்வுகளில் இக்கற்றையானது அசையாமல் இருக்கின்ற இலக்கொன்றின்மீது மோதும் வகையிலேயே சோதனைகள் நிகழும். இத்தகைய மோதல்களில் பயனுறு ஆற்றல் மோதும் கற்றையின் ஆற்றலை விடக் குறைவாகவே இருக்கும் என்பது இயக்கவியல் முடிவு. அதிலும், அதிவேகங்களில் கற்றை இயங்கும் போது சார்பியல் கொள்கையும் குறுக்கிடும். ஆகவே, அவ்வேகங்களில் பயனுறு ஆற்றல் மேலும் குறைவாக அமையும் என்பது ஆய்வுரை. காட்டாக 100 *BeV* புரோட்டான் கற்றையின் பயனுறு ஆற்றல் 10·5 *BeV* அளவே ஆகும். இத்தகைய காரணங்களால், பயனுறு ஆற்றலை அதிகரிக்கும் வகையில் புதுப்புதுக் கருத்துக்களும் செயல் முறைகளும் வளரலாயின.

அமெரிக்காவில் மியூரா (*Mura Midwestern Universites Research Association*) என்ற நிறுவனம் இத்துறையில் பல ஆண்டுகளாகப் பணியாற்றி வருகிறது. ரஷ்யாவிலும், இத்தாலியிலும், செர்ன் (*CERN*) நிறுவனத்திலும் இத்துறையில் முயற்சி செய்து வருகிறார்கள். இருபொருள்கள் எதிரெதிராக இயங்கி ஒன்றோடொன்று மோதிக் கொள்ளும் போது பெரும ஆற்றல் கிடைக்கும். ஆகவே, இதையொட்டி இரு துகள்கற்றைகளை எதிர்த்து மோதச் செய்து பெரும ஆற்றல் பெறலாம் என்பது தெளிவு. இத்தகைய ஆய்வைச் செய்வதற்குத் தேவையான நிபந்தனைகள் பற்றிய பல ஆய்வுகள் நடந்து வருகின்றன.

ஒரு பொறியிலிருந்து இருவளையங்களுக்குள் துகள்கள் அனுப்பப்பட்டுக் கற்றைகள் நிறுவப் பெறும். அவை சுற்றிக் கொண்டே இருக்கும். தகுந்த காந்த அமைப்புகள் கொண்டு கற்றைகள் நலம்

கெடாமல் பாதுகாக்கப்படும். உரிய காலத்தில் இரு வளையங்களும் தொடர்பு பெறும். இரு கற்றைகளும் எதிரெதிராக இணைந்து உயர்ந்த ஆற்றல் அளிக்கின்றன. இவ்வாறு எலெக்ட்ரான்—எலெக்ட்ரான் மோதல் காரணமாக அமையும் சேமிப்புப் பொறி *(Storage Machine)* ஸ்டான்ஃபோர்டு பல்கலைக் கழகத்திலும் நோவாசிபர்க் பல்கலைக் கழகத்திலும் செயல்படுகின்றன. செர்ன் நிறுவனத்தில் அமைக்கப்பட்டுள்ள புரோட்டான் - புரோட்டான் மோதல் பொறியானது 28 *BeV* ஆற்றல் கொண்ட கற்றையினை அளிக்கின்றது. இந்தச் சேமிப்பு வளையப் பொறிக்காகும் செலவு 6 கோடி ரூபாய் என்று கணக்கிடப்பட்டுள்ளது. 25 கோடி ரூபாய் செலவில் துகள் பொறிகள் அமைப்பதற்கான முன்னேற்பாடுகள் இருக்கும்போது இச் செலவு குறைவானதாக அமைகின்றது.

இத் துறையில் இன்னுமொரு வளர்ச்சி தோன்றியுள்ளது. இருவேறு வளையங்களில் எதிர்த்திசையில் இயங்கும் ஒரே வகையான துகள் கற்றைகளுக்குப் பதிலாக, ஒரே வளையத்தில் இயங்கும் இருவகையான துகள், ஆன்ட்டி துகள் கற்றை கொண்டும் இத்தகையதொரு மோதல் மூலம் ஆற்றல் பெறலாம் என்று கண்டுள்ளனர். இவ்வகையில் எலெக்ட்ரான், பாஸிட்ரான் கற்றைகளைக் கொண்ட சோதனைகள் ரோம், ஆர்சே, நோவாசிபர்க் ஆகிய இடங்களில் நடந்தேறியுள்ளன. அமெரிக்காவில் 3 *BeV* சேமிப்புப் பொறிகளை அமைக்க முயற்சிகள் மேற்கொள்ளப்படுகின்றன.

இத்தகைய புதுமைப் பொறி கொண்டு சில சிறப்புச் சோதனைகள் தான் செய்ய முடியுமேயொழிய வழக்கமான சோதனைகளைச் செய்வது எளிதன்று. ஆயினும், இப் புதுமைப் பொறியின் எதிர்காலம் பற்றி முடிவாக ஒன்றும் சொல்வதற்கில்லை. தவிர, இத்தகைய பொறிகள் பற்றிய செயல்பாட்டுச் சிக்கல்களெல்லாம் ஆராயப்பட்டு வருகின்றன. இப் பொறிக்கு நல்ல எதிர்காலம் உண்டு என்ற நம்பிக்கையுடன் தொடர்ந்து இதனைச் செம்மைப்படுத்துவதற்கு முயன்றுவரும் பிரின்ஸ்டன் பேராசிரியர் ஓ நீல் *(O' Neill)* என்னும் பெயரிய அறிவியலாளர் முயற்சி போற்றுதற்குரியது.

10.6. முடிவுரை

இவ்வாறாக, துகள் முடுக்கும் பொறிகள் அணுவியலிலும் அறிவியலிலும் சிறந்த சாதனைகளை உருவாக்கி இருக்கின்றன என்பதனைப் பல்வேறு எடுத்துக் காட்டுகளால் கண்டோம். ஏழ்நிலைப் பொறிகளும் மனிதனுடைய அறிவு வளர்ச்சிக்கும் திறனுக்கும் சான்றுகளாக அமைவதைப் பார்த்தோம். அணுவியலில் காணப்பட்ட ஒரு சில புதுமைகளே இங்குக் கூறப்பட்டன. அணுக்கருவில் அமைந்துள்ள

துகள்களிடையே நிலவும் அருமையான விசைவுகளைப் பற்றி இன்னும் தெளிவார்ந்த செய்திகளை நாம் அறியவில்லை. இத்தகைய துறைகளிலெல்லாம் இனிவரும் பொறிகளின் உதவியால் பல அரிய கருத்துகள் கிடைக்கும் என்று எதிர்பார்க்கலாம்.

பெரும் செலவு செய்து அமைக்கப்படும் துகள் முடுக்கும் பொறிகள் அனைத்துலக நாடுகளிடையே ஒற்றுமை நிலவவேண்டும் என்பதனையும் அறிவுறுத்துகின்றன. பல கோடி ரூபாய் செலவில் அமைக்கப்படும் ஒரு பொறியானது சிறந்த முறையில் திட்டமிடப் பெற்றுச் செயல்படுத்தப்பட வேண்டும். பன்னிரண்டு ஐரோப்பிய நாடுகள் ஒற்றுமையாகப் பொதுச் செலவில் சொர்ன் ஆய்வரங்கத்தை அமைத்துப் பணி செய்வது நலலதொரு எடுத்துக்காட்டாக விளங்குகிறது. ஆய்வரங்கத்திற்கான இடத்தைத் தேர்ந்தெடுத்தல் அதற்குரிய சூழ்நிலையை ஏற்படுத்தல், சிறந்த ஆய்வாளர்களைத் தேர்ந்தெடுத்தல், பயனுள்ள பணிகளைத் திட்டமிடுதல் முதலிய பல்வேறு அங்கங்களைப் பற்றியும் சிறந்த முடிவுகள் தேவையாகும். ஆகவே, இத்தகைய அனைத்துலக ஒத்துழைப்பின் அடிப்படையில் இனியும் பல விந்தைப் பொறிகள் அமைக்கப்பெற்று, மக்கள் அறிவு வளரும் வகையிலும், வாழ்வு சிறக்கும் வகையிலும் பணிசெய்யும் என்று நம்புவோமாக!

மேற்கோள் நூல்கள் பட்டியல்

(1) Particle Accelerators (1962), Livingston, M. S., & Blewett, J. P., McGraw - Hill, New York.

(2) Principles of Cyclic Particle Accelerators (1961), Livingood, J. J., Van Nostrand Company, Princeton, New Jersey.

(3) Principles of Particle Accelerators (1968), Enrico Persico., Ezio Ferrori & Segre, E., W. E. Benjamin, Inc. New York.

(4) Particle Accelerators (1967), Rudolf Kollath, Translated by W. Summer, Sir Issac Pitman & Sons Ltd,. London.

(5) Particle Acceleration (1968), Rosenblatt, J. Methuen & Co. Ltd., London.

(6) Particle Accelerators (1967), Robert Gouiran, World University Library, Weidenfeld and Nicolson, London.

(7) Recent Advances in Science (1961), Morris H. Shamos & George A. Murphy, Science Editions, Inc., New York.

(8) Nuclei and Particles, Emilio Segre, W. A. Benjamin, Inc., New York.

(9) Accelerators, Robert R. Wilson & Raphel Littaner, Science Study Series, Doubleday & Company, Inc., New York.

கலைச்சொற்கள் பட்டியல்

(தமிழ் — ஆங்கிலம்)

அ

அகக்குவிப்பு — Self Focussing
அண்டவெளி இயற்பியல் — Space Physics
அணியம் — Determinant
அணு இயற்பியல் — Atomic Physics
அணுக்கரு — Nucleus
அணுக்கரு இயற்பியல் — Nuclear Physics
அணுக்கருப் பிளவை — Nuclear Fission
அணுக்கரு மாற்றம் — Nuclear Transmutation
அணுக்கரு விசைகள் — Nuclear Forces
அதிபரவளையம் — Hyperbola
அதிபரவளைய உருளை — Hyperbolic Cylinder
அதிபரவளையச் சார்பெண்கள் — Hyperbolic Functions
அதிர்வெண் — Frequency
அதிர்வெண் பண்பேற்ற வட்டிப்பு — Frequency Modulation Cycle
அதிர்வெண் பண்பேற்ற வீதம் — Rate of Frequency Modulation
அயனி — Ion
அயனிச் செறிவு — Ion Intensity
அயனி வாய் — Ion Source
அரை அலைவுநேரம் — Half Period
அரை பீட்டா லாம்டா முடுக்கி — Half Beta Lambda Accelerator
அரை வட்டிப்பு — Half Cycle
அல்வாரெஸின் நேரியல் முடுக்கி — Alvarez Linear Accelerator
அலைகின்ற சுற்று — Oscillating Circuit
அலைகின்ற மின்புலம் — Oscillating Electric Field
அலைவான் — Oscillator
அலைவு — Oscillation

ஆ

ஆயத்திசை — Axial Direction
ஆயத்திசை அலைவு — Axial Oscillation

ஆயத்திசை குவிப்பு — Axial Focussing
ஆயத்திசை நிலைப்பாடு — Axial Stability
ஆரத்திசை — Radial Direction
ஆரத்திசை அலைவு — Radial Oscillation
ஆரத்திசை இயக்கம் — Radial Motion
ஆரத்திசை நிலைப்பாடு — Radial Stability
ஆற்றல் அலைவு — Energy Oscillation
ஆற்றல் ஈட்டம் — Energy Gain
ஆற்றல் பகிர்வு — Energy Distribution
ஆன்ட்டி துகள் — Anti Particle

இ

இசைக் குழாய் — Organ Pipe
இசைவு ஆற்றல் — Synchronous Energy
இசைவுத் தடம் — Synchronous Orbit
இசைவுறு துகள் — Synchronous Particle
இசைவுறுத — Non-Synchronous
இசைவுறுத் துகள் — Non-Synchronous Particle
இடைத் தளம் — Medium Plane
இடைவெளி நீளம் — Gap length
இணைக் கலப்பெண் — Complex Conjugate
இயக்க மதிப்புகள் — Dynamic Values
இயக்கு திறம் — Efficiency
இயங்கும் அலை — Travelling Wave
இரும்பு உள்ளீடு — Iron Core
இருவாட்டம் — Alternating Gradient
இருவாட்டந்தரு குவிப்பு — Alternating Gradient Focussing
இருவாட்டந்தரு வில்லை — Alternating Gradient Lens
இருவாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான் — Alternating Gradient Synchrotron
இழை — Filament

ஈ

ஈறிலி — Infinite
ஈறிலி கலைக்கோண வேகம் — Infinite Phase Velocity

உ

உச்ச மதிப்பு — Peak Value
உட்குழிவு — Cavity
உட்செலுத்தல் — Injection

உட்செலுத்தி — Injector
உட்செலுத்தும் இயக்குதிறம் — Injection Efficiency
உட்புகுதிறன் — Permeability
உதவிச்சுருள் — Auxillary Coil
உந்தம் — Momentum
உந்த இறுக்கம் — Momentum Compaction
உந்த ஈட்டம் — Gain in Momentum
உயர் அதிர்வெண் — High Frequency
உயர் ஆற்றல் ஆய்வரங்கம் — High Energy Laboratory
உயர் மின்னழுத்த முனை — High Voltage Terminal
உயர் வெற்றிடம் — High Vacuum
உயர் வெற்றிட அறை — High Vacuum Chamber
உராய்வு விசை — Force of Friction
உருப்பிறழ்ச்சி விளைவுகள் — Distorting Effects
உருப் பிறழ்வு — Distortion
உருளை வடிவ உட்குழிவு — Cylindrical Cavity
உலோக ஒத்திசைவு உட்குழிவு — Metal Resonant Cavity
உள்ளிடு கற்றை — Input Beam
உள்வாங்கி — Inflector

எ

எண்மக் கோட்பாடு — Eight-Fold Theory
எதிர்க்குறி அரை வட்டிப்பு — Negative Half Cycle
எதிர்க்குறிக் கலைக்கோணம் — Negative Phase
எலெக்ட்ரான் அலைவு அயனிவாய் — Electron Oscillation Ion Source
எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான் — Electron Synchrotron
எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கி — Electron Gun
எலெக்ட்ரான் வோல்ட் — Electron Volt

ஏ

ஏற்கத் தகுந்த — Acceptable

ஒ

ஒத்திசைவு — Rosonance
ஒத்திசைவுக் கோடுகள் — Resonance Lines
ஒத்திசைவு முடுக்கிகள் — Resonance Accelerators
ஒருபடித்தான — Homogeneous
ஒரு சார்பு — Bias
ஒரு சார்புப் புலம் — Bias Field
ஒருமைய — Concentric

ஒ

ஓய்வுநிலை ஆற்றல் — Rest Energy
ஓய்வுநிலை நிறை — Rest Mass
ஓரச்சு அமைப்பு — Coaxial System
ஓரலகு கோணம் — Unit Angle
ஓரலகு கோணச் சுற்று — Unit Angle of Revolution
ஓரியல் மோதல் முடுக்கம் — Coherent Impact Acceleration

க

கட்டுப்படுத்தும் துருவம் — Controlling Pole
கடக்குங் காலக் கூற்றெண் — Transit time factor
கண்ணி — Loop
கணக்கிடும் பொறி — Computor
கலைக்கோணம் — Phase
கலைக்கோண அலைவு — Phase Oscillation
கலைக்கோணப் படம் — Phase Diagram
கலைக்கோண நெடுக்கம் — Range of Phase
கலைக்கோண வெளி — Phase Space
கழுத்துக் கச்சை படம் — Neck Tie Diagram
கற்பனைக் கணிப்பளவை — Imaginary Quantity
காக்ராஃப்ட் வால்டன் பொறி — Cockroft Walton Machine
காந்த அழுத்தம் — Magnetic Potential
காந்த உட்புகுதிறன் — Magnetic Permeability
காந்த ஒத்திசைவு — Magnetic Resonance
காந்த ஒத்திசைவு முடுக்கி — Magnetic Resonance Accelerator
காந்தக் குவிப்பு — Magnetic Focussing
காந்தச் சுற்று — Magnetic Circuit
காந்தத் தெவிட்டு நிலை — Magnetic Saturation
காந்த மறுப்பு — Magnetic Reluctance
காஸ்மிக் கதிர் — Cosmic Ray
கிடைத் தளம் — Horizontal Plane
கிடைமட்ட இயக்கம் — Horizontal Motion
கிரிடு — Grid
கிளர்ச்சி யூட்டப்பட்ட — Excited
கிளர் சுருள் — Exciter Coil
குமிழ்க் கலம் — Bubble Chamber
குவாண்டம் — Quantum
குவாண்டம் இயற்பியல் — Quantum Physics

குவாண்டம் மின்இயக்கவியல்	—	Quantum Electro Dynamics
குவிக்கின்ற விசைகள்	—	Focussing Forces
குவித்தல்	—	Focussing
குவித்து விரிக்கும் இணை	—	Converging Diverging Pair
குவித்திடு வில்லை	—	Converging Lens
குவிதலகற்றல்	—	Defocussing
குவிதலகற்றும் விசைகள்	—	Dofocussing Forces
குழுநிலைக் கொள்கை	—	Group Theory
குறுக்குவெட்டுத் தோற்றம்	—	Cross Section
குறைபாடு	—	Reduction
கூறு	—	Cell
கூறுநீளம்	—	Cell Length
கொசைன் அலைவுகள்	—	Cosine Oscillation
கொத்தகற்றிகள்	—	Debunchers
கொத்தாக்கிகள்	—	Bunchers

ச

சமச்சீர் அச்சு	—	Axis of Symmetry
சமநிலை ஆற்றல்	—	Equilibrium Energy
சமநிலைக் கோணம்	—	Equilibrium Angle
சரிவு	—	Slope
சார்பியல் கொள்கை	—	Theory of Relativity
சார்பியல் சாராத	—	Non-Relativistic
சார்பியல் சாராத சமன்பாடு	—	Non-Relativistic Equation
சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான்	—	Synchrocyclotron
சிங்க்ரோட்ரான்	—	Synchrotron
சிங்க்ரோட்ரான் அலைவுகள்	—	Synchrotron Oscillations
சிற்றச்சு	—	Minor Axis
சிற்றுலைவு	—	Small Perturbation
சீரிசை இயக்கம்	—	Simple Harmomic Motion
சுணக்கமடைதல்	—	Retarding
சுழலு மின்புலம்	—	Electric Rotational Field
சுழி மின்னோட்டம்	—	Eddy current
சுழியம்	—	Zero
சுற்று	—	Circuit
சுற்று அதிர்வெண்	—	Revolution Frequency
சுற்றோட்டம்	—	Circulation
சூடேற்றப்பட்ட இழை	—	Hot Filament
சூழ்மின்னூட்டம்	—	Space Charge

செங்குத்து அலைவு — Vertical Oscillation
செங்குத்து இயக்கம் — Vertical Motion
செங்குத்து திசை — Vertical Direction
செங்குத்து நிலைப்பாடு — Vertical Stability
செயற்கைக் கதிரியக்கம் — Induced Radioactivity
செயலெதிர் ஆற்றல் — Interaction Energy
சேமிப்பு வளையம் — Storage Ring
சைக்ளோட்ரான் — Cyclotron
சைன் வளைவு — Sine Curve

ட

டிரையோடு — Triode
டீக்கள் — Dees
டையோடு — Diode

த

தடம் — Orbit
தட அதிர்வெண் — Orbital Frequency
தடச்சுற்று அதிர்வெண் — Orbital Revolution Frequency
தட நிலைப்பாடு — Orbit Stability
தட வேகம் — Orbital Velocity
தடையுறு அலைவுகள் — Damped Oscillations
தலைச் சுருள் — Primary Coil
தவிர்நிலைக் கோடுகள் — Forbidden Lines
திசைக்கோணம் — Azimuthal Angle
திண்மைக் காந்தம் — Solid Magnet
திரவ ஹைட்ரஜன் — Liquid Hydrogen
திரிவுநிலை ஆற்றல் — Transition Energy
திருப்பு இரட்டை — Torque
துகள் — Particle
துகள் செலுத்தி — Particle Injector
துகள் முடுக்கி — Particle Accelerator
துடிப்பியக்கம் — Pulsed Operation
துளையீடு மின்முனை — Probe Electrode
தெவிட்டுதல் — Saturation
தொகுப்பு (கூறு) — Sector
தொகுபயன் புலம் — Resultant Field
தொகுநி காணல் — Integration
தொடுவியலாக — Tangentially
தொலைக் காட்சி — Television

ந

நகர்வு குழாய்	— Drift Tube
நகர்வு வெளி	— Drift Space
நடுநிலைத்தடம்	— Equilibrium Orbit
நடுநிலை வாயு மூலக் கூறுகள்	— Neutral Gas Molecules
நான்கு துருவங்கள் (நால்துருவங்கள்)	— Quadrupoles
நால்துருவ வில்லைகள்	— Quadrupole Lenses
நிலை அதிர்வெண் சைக்ளோட்ரான்	— Fixed Frequency Cyclotron
நிலை அலை	— Standing Wave
நிலைப்பாடு	— Stability
நிலைமாறாச் சூழ்நிலை	— Steady State
நிலைமின்னியல் குவிதலகற்றல்	— Electrostatic Defocussing
நிலைமின்னியல் விலக்கம்	— Electrostatic Deflection
நிலையான கலைக்கோண நெடுக்கம்	— Stable Range of Phase
நிலையான தடம்	— Stable Orbit
நீளவாகு கூறு	— Longitudinal Component
நேர்குத்து	— Perpendicular
நேர்க்குறிக் கலைக்கோணம்	— Positive Phase
நேர்மின்னழுத்தக் கருவி	— D. C. Generator
நேரியல் பொறி	— Linear Machine
நேரியல் தொடர்பு	— Linear Relation
நேரியல் முடுக்கி	— Linear Accelerator

ப

பக்க இடப்பெயர்ச்சி	— Lateral Displacement
பகுதி காணல்	— Differentiation
படிவம்	— Image
படிவ பொருள் தொடர்பு	— Image-Object Relation
பண்பேற்றம்	— Modulation
பந்தயப்பாதை	— Race Track
பந்தயப்பாதை சிங்க்ரோட்ரான்	— Race Track Synchrotron
பயனுள்ள கலைக்கோண நெடுக்கம்	— Useful Range of Phases
பாய அடர்த்தி	— Flux Density
பாய மாற்றம்	— Change in Flux
பிளாஸ்மா	— Plasma
பீட்டாட்ரான்	— Betatron
பீட்டாட்ரான் அலைவு	— Betatron Oscillation

பீட்டாட்ரான் தொடர்பு — Betatron Relation
பீட்டா லாம்டா முடுக்கி — Beta Lambda Accelerator
புலம் — Field
புல எண் — Field Index
புலச் சிதைவின் எல்லை — Boundary of Field Decay
புலப் பிறழ்ச்சி — Field Distortion
புற மின்இயற்றி — External Generator
பெருக்கி — Amplifier
பேரச்சு — Major Axis
பொறி இயக்கும் புள்ளி — Operating Point

ம

மத்தியத் தளம் — Centre Plane
மாற்றத்தின் கூற்றுத் தகவு — Ratio of Fractional Change
மாறு வாட்டம் — Constant Gradient
மாறுகின்ற காந்தப்புலம் — Alternating Magnetic Field
மாறுநிலை ஆரம் — Critical Radius
மாறுநிலை எல்லை — Critical Region
மின்னிறக்கம் — Discharge
மின்னிறக்கக் குழாய் — Discharge Tube
மின் ஏற்பி — Condenser, Capacitance
மின் ஏற்புத் திறன் — Capacity
மின் திறன் — Electric Power
மின் நிலைமம் — Inductance
மின் மாற்றி — Transformer
மின் மினுப்பு எண்ணி — Scintillation Counter
மின் மையம் — Electric Centre
மின்னழுத்த வீழ்ச்சி — Potential Drop
மீட்பு விசை — Restoring Force
மீள் கற்றை — Emergent Beam
முடுக்கந்தரு மின் முனைகள் — Accelerating Electrodes
முடுக்கி — Accelerator
முடுக்கும் சாதனம் — Accelerating Unit
முதன்மை மூலைவிட்டக் கூறுகள் — Trace (Matrix)
முதுபழங் கொள்கை — Classical Theory
முழுஎண் மடங்கு — Integral Multiple
முன்னுரைப்பு — Prediction
மெசான் — Meson
மென் குவிப்பு — Weak Focussing

மென் குவிப்புப் பொறி — Weak Focussing Machine
மெய் எண் — Real Number
மேட்ரிக்ஸ் — Matıix
மேல் தகடுகள் — Upper Plates
மோதல் ஆய்வுகள் — Collision Experiments

ர

ரேடியன் அதிர்வெண் — Radian Frequency
ரேடியோ அதிர்வெண் — Radio Frequency
ரேடியோ அதிர்வெண் அயனிவாய் — Radio Frequency Ion Source
ரேடியோ அதிர்வெண் அலைவான் — Radio Frequency Oscillator

ல

லொரெண்ட்ஸ் சுருக்கம் — Lorentz Contraction
லொரெண்ட்ஸ் விசை — Lorentz Force

வ

வரம்பு நீள் வட்டம் — Limiting Ellipse
வரம்பு மதிப்பு — Limiting Value
வளைபந்து வடிவம் — Doughnut Shape
வளைபந்து வடிவ அறை — Doughnut Shape Chambeı
வன் குவிப்பு — Strong Focussing
வான்டிகிராஃப் இயற்றி — Vande Graff Generator
வாழ்வுக் காலம் — Life Time
விதரோவின் நேரியல் முடுக்கி — Wiederö's Linear Accelerator
விசைக் கோடுகள் — Lines of Force
விரிகோணம் — Angle of Divergence
விரித்துக் குவிக்கும் இணை — Diverging Converging Pair
விரித்திடு வில்லை — Divergent Lens
வில் மின்னிறக்கம் — Arc Discharge
விலக்கப்பட்ட — Repelled
வீச்சு — Amplitude
வெக்டார் — Vector
வெப்ப அயனி வெளியீடு — Thermionic Emission
வெப்பச் சமநிலைப்பாடு — Thermal Equilibrium
வேக வடிப்பான் — Velocity Counter

ஹை

ஹைபெரான் Hyperon

கலைச்சொற்கள் பட்டியல்

(ஆங்கிலம்—தமிழ்)

A

Accelerating Electrodes — முடுக்கந்தரு மின் முனைகள்
Accelerating Unit — முடுக்கும் சாதனம்
Accelerator — முடுக்கி
Acceptable — ஏற்கத் தகுந்த
Alternate Gradient — இருவாட்டம்
Alternating Gradient Focussing — இரு வாட்டந்தரு குவிப்பு
Alternating Gradient Lens — இரு வாட்டந்தரு வில்லை
Alternating Gradient Synchrotron — இரு வாட்டந்தரு சிங்க்ரோட்ரான்
Alternating Magnetic Field — மாறுகின்ற காந்தப்புலம்
Alvarez Linear Accelerator — அல்வாரெஸின் நேரியல்

Amplifier — பெருக்கி
Amplitude — வீச்சு
Angle of Divergence — விரிகோணம்
Anti Particles — ஆன்ட்டித் துகள்கள்
Arc Discharge — வில் மின்னிறக்கம்
Atomic Physics — அணு இயற்பியல்
Auxillary Coil — உதவிச் சுருள்
Axial Direction — ஆயத்திசை
Axial Focussing — ஆயத்திசைக் குவிப்பு
Axial Oscillation — ஆயத்திசை அலைவு
Axial Stability — ஆயத்திசை நிலைப்பாடு
Axis of Symmetry — சமச்சீர் அச்சு
Azimuthal Angle — திசைக் கோணம்

B

Beta Lambda Accelerator — பீட்டா லாம்டா முடுக்கி
Betatron — பீட்டாட்ரான்
Betatron Oscillation — பீட்டாட்ரான் அலைவு
Betatron Relation — பீட்டாட்ரான் தொடர்பு
Bias — ஒரு சார்பு

Bias Field — ஒருசார்புப் புலம்
Boundary of Field Decay — புலச் சிதைவின் எல்லை
Bubble Chamber — குமிழ்க் கலம்
Bunchers — கொத்தாக்கிகள்

C

Capacitance — மின் ஏற்பி
Capacity — மின் ஏற்புத்திறன்
Cavity — உட்குழிவு
Cell — கூறு
Cell Length — கூறு நீளம்
Centre Plane — மத்தியத் தளம்
Change in Flux — பாய மாற்றம்
Circuit — சுற்று
Circulation — சுற்றோட்டம்
Classical Theory — முதுபழங் கொள்கை
Coaxial System — ஓரச்சு அமைப்பு
Cockroft Walton Machine — காக்ராஃப்ட் வால்டன் பொறி
Coherent Impact Acceleration — ஓரியல் மோதல் முடுக்கம்
Collision Experiments — மோதல் ஆய்வுகள்
Complex Conjugate — இணைக் கலப்பெண்
Concentric — ஒருமைய
Condenser — மின் ஏற்பி
Constant Gradient — மாறா வாட்டம்
Controlling Poles — கட்டுப்படுத்தும் துருவங்கள்
Convergent Lens — குவித்திடு வில்லை
Converging Diverging Pair — குவித்து விரிக்கும் இணை
Cosine Oscillations — கொசைன் அலைவுகள்
Cosmic Ray — காஸ்மிக் கதிர்
Critical Radius — மாறுநிலை ஆரம்
Critical Region — மாறுநிலை எல்லை
Cross Section — குறுக்குவெட்டுத் தோற்றம்
Cyclotron — சைக்ளோட்ரான்
Cylindrical Cavity — உருளைவடிவ உட்குழிவு

D

Damped Oscillations — தடையுறு அலைவுகள்
D. C. Generator — நேர்மின்னழுத்தக் கருவி
Debunchers — கொத்தகற்றிகள்
Dees — டீக்கள்

Defocussing — குவிதல் அகற்றல்
Defocussing Forces — குவிதல் அகற்றும் விசைகள்
Determinant — அணியம்
Differentiation — பகுறி காணல்
Diode — டையோடு
Discharge — மின்னிறக்கம்
Discharge Tubes — மின்னிறக்கக் குழாய்கள்
Distortion — உருப்பிறழ்வு
Distorting Effects — உருப்பிறழ்ச்சி விளைவுகள்
Divergent Lens — விரித்திடு வில்லை
Diverging Converging Pair — விரித்துக் குவிக்கும் இணை
Doughnut Shape — வளைபந்து வடிவம்
Doughnut Shape Chamber — வளைபந்து வடிவ அறை
Drift Space — நகர்வு வெளி
Drift tube — நகர்வு குழாய்
Dynamic values — இயக்க மதிப்புகள்

E

Eddy Current — சுழி மின்னோட்டம்
Efficiency — இயக்கு திறம்
Eight-Fold Theory — எண்மக் கோட்பாடு
Electric Centre — மின் மையம்
Electric Power — மின் திறன்
Electric Rotational Field — சுழலு மின்புலம்
Electron Gun — எலெக்ட்ரான் துப்பாக்கி
Electron Oscillation Sources — எலெக்ட்ரான் அலைவு அயனிவாய்கள்
Electron Synchrotron — எலெக்ட்ரான் சிங்க்ரோட்ரான்
Electron Volt — எலெக்ட்ரான் வோல்ட்
Electrostatic Defocussing — நிலைமின்னியல் குவிதலகற்றல்
Electrostatic Deflection — நிலைமின்னியல் விலக்கம்
Emergent Beam — மீள் கற்றை
Energy Distribution — ஆற்றல் பகிர்வு
Energy Gain — ஆற்றல் ஈட்டம்
Energy Oscillation — ஆற்றல் அலைவு
Equilibrium Angle — சமநிலைக் கோணம்
Equilibrium Energy — சமநிலை ஆற்றல்
Equilibrium Orbit — நடுநிலைத் தடம்
Excited — கிளர்ச்சியூட்டப்பட்ட

Exciter Coil — கிளர் சுருள்
External Generator — புற மின்இயற்றி

F

Field — புலம்
Field Distortion — புலப் பிறழ்ச்சி
Field Index — புல எண்
Filament — இழை
Fixed Frequency Cyclotron — நிலை அதிர்வெண் சைக்ளோட்ரான்
Flux Density — பாய அடர்த்தி
Focussing — குவித்தல்
Focussing Forces — குவிக்கின்ற விசைகள்
Forbidden Lines — தவிர்நிலைக் கோடுகள்
Force of friction — உராய்வு விசை
Frequency — அதிர்வெண்
Frequency Modulation Cycle — அதிர்வெண் பண்பேற்ற வட்டிப்பு

G

Gain in Momentum — உந்த ஈட்டம்
Gap Length — இடைவெளி நீளம்
Gradient — வாட்டம்
Grid — கிரிடு
Group Theory — குழுநிலைக் கொள்கை

H

Half Beta-Lambda Accelerator — அரை பீட்டா லாம்டா முடுக்கி
Half Cycle — அரை வட்டிப்பு
Half Period — அரை அலைவு நேரம்
H. V. Terminal — உயர் மின்னழுத்த முனை
High Energy Laboratory — உயர் ஆற்றல் ஆய்வரங்கம்
High Frequency — உயர் அதிர்வெண்
High Vacuum — உயர் வெற்றிடம்
High Vacuum Chamber — உயர் வெற்றிட அறை
Homogeneous — ஒரு படித்தான
Horizontal Motion — கிடைமட்ட இயக்கம்
Horizontal Plane — கிடைத் தளம்
Hot Filament — சூடேற்றப்பட்ட இழை
Hyperbola — அதிபர வளையம்

Hyperbolic Cylinder — அதிபர வளைய உருளை
Hyperbolic Functions — அதிபர வளையச் சார்பெண்கள்
Hyperon — ஹைபெரான்

I

Image — படிவம்
Image-Object Relation — படிவ பொருள் தொடர்பு
Imaginary quantity — கற்பனைக் கணிப்பளவை
Induced Radioactivity — செயற்கைக் கதிரியக்கம்
Inductance — மின் நிலைமம்
Infinite — ஈறிலி
Infinite Phase Velocity — ஈறிலி கலைக்கோண வேகம்
Inflector — உள்வாங்கி
Injection — உட்செலுத்தல்
Injection Efficiency — உட்செலுத்தும் இயக்குதிறம்
Injector — உட்செலுத்தி
Input Beam — உள்ளிடு கற்றை
Integral Multiple — முழு எண் மடங்கு
Integration — தொகுநி காணல்
Interaction Energy — செயலெதிர் ஆற்றல்
Ion — அயனி
Ion Intensity — அயனிச் செறிவு
Ion Sources — அயனி வாய்கள்
Iron Core — இரும்பு உள்ளீடு

L

Lateral Displacement — பக்க இடப்பெயர்ச்சி
Life Time — வாழ்வுக் காலம்
Limiting Ellipse — வரம்பு நீள்வட்டம்
Limiting Value — வரம்பு மதிப்பு
Linear Accelerator — நேரியல் முடுக்கி
Linear Machine — நேரியல் பொறி
Linear Relation — நேரியல் தொடர்பு
Lines of Force — விசைக் கோடுகள்
Liquid Hydrogen — திரவ ஹைடிரஜன்
Longitudinal Component — நீளவாகு கூறு
Loop — கண்ணி
Lorentz Contraction — லொரெண்ட்ஸ் சுருக்கம்
Lorentz Force — லொரெண்ட்ஸ் விசை

M

Magnetic Circuit — காந்தச் சுற்று
Magnetic Flux — காந்தப் பாயம்
Magnetic Focussing — காந்தக் குவிப்பு
Magnetic Permeability — காந்த உட்புகுதிறன்
Magnetic Potential — காந்த அழுத்தம்
Magnetic Reluctance — காந்த மறுப்பு
Magnetic Resonance — காந்த ஒத்திசைவு
Magnetic Resonance Accelerator — காந்த ஒத்திசைவு முடுக்கி
Magnetic Saturation — காந்தத் தெவிட்டு நிலை
Major Axis — பேரச்சு
Matrix — மேட்ரிக்ஸ்
Median Plane — இடைத் தளம்
Meson — மெசான்
Metal Resonant Cavity — உலோக ஒத்திசைவு உட்குழிவு
Minor Axis — சிற்றச்சு
Modulation — பண்பேற்றம்
Momentum — உந்தம்
Momentum Compaction — உந்த இறுக்கம்

N

Neck-tie diagram — கழுத்துக் கச்சை படம்
Negative Gradient — எதிர்க்குறி வாட்டம்
Negative Half Cycle — எதிர்க்குறி அரை வட்டிப்பு
Negative Phase — எதிர்க்குறி கலைக்கோணம்
Neutral Gas Molecules — நடுநிலை வாயு மூலக்கூறுகள்
Non-Relativistic — சார்பியல் சாராத
Non-Relativistic Equation — சார்பியல் சாராத சமன்பாடு
Non-Synchronous — இசைவுறாத
Non-Synchronous Particles — இசைவுறாத் துகள்கள்
Nucleus — அணுக்கரு
Nuclear Fisson — அணுக்கருப் பிளவை
Nuclear Forces — அணுக்கரு விசைகள்
Nuclear Physics — அணுக்கரு இயற்பியல்

O

Nuclear Transmutation — அணுக்கரு மாற்றம்
Operating Point — பொறி இயக்கும் புள்ளி
Orbit — தடம்
Orbital Frequency — தட அதிர்வெண்
Orbital Revolution Frequency — தடச்சுற்று அதிர்வெண்
Orbital Stability — தட நிலைப்பாடு

Orbital Velocity — தட வேகம்
Organ Pipe — இசைக் குழாய்
Oscillating Circuit — அலைகின்ற சுற்று
Oscillating Electric Field — அலைகின்ற மின்புலம்
Oscillation — அலைவு
Oscillator — அலைவான்

P

Particle — துகள்
Particle Accelerator — துகள் முடுக்கி
Particle Injector — துகள் செலுத்தி
Peak Value — உச்ச மதிப்பு
Permeability — உட்புகுதிறன்
Perpendicular — நேர்குத்து
Phase — கலைக்கோணம்
Phase Diagram — கலைக்கோணப் படம்
Phase Oscillation — கலைக்கோண அலைவு
Phase Shift — கலைக்கோணப் பெயர்ச்சி
Phase Space — கலைக்கோண வெளி
Phase Stability — கலைக்கோண நிலைப்பாடு
Phase Velocity — கலைக்கோண வேகம்
Plasma — பிளாஸ்மா
Positive Phase — நேர்க்குறிக்கலைக் கோணம்
Potential Drop — மின்னழுத்த வீழ்ச்சி
Prediction — முன்னுரைப்பு
Primary Coil — தலைச் சுருள்
Probe Electrode — துளையீடு மின்முனை
Pulsed Operation — துடிப்பியக்கம்

Q

Quadrupoles — நான்கு துருவங்கள் (நால்துருவங்கள்)
Quadrupole Lenses — நால்துருவ வில்லைகள்
Quantum — குவாண்டம்
Quantum Electro Dynamics — குவாண்டம் மின் இயக்கவியல்
Quantum Physics — குவாண்டம் இயற்பியல்

R

Race Track — பந்தயப் பாதை
Race Track - Synchrotron — பந்தயப் பாதை சிங்க்ரோட்ரான்
Radial Direction — ஆரத்திசை
Radial Motion — ஆரத்திசை இயக்கம்
Radial Oscillation — ஆரத்திசை அலைவு

Radial Stability — ஆரத்திசை நிலைப்பாடு
Radian Frequency — ரேடியன் அதிர்வெண்
Radio Frequency — ரேடியோ அதிர்வெண்
Radio Frequency Ion Source — ரேடியோ அதிர்வெண் அயனிவாய்
Radio Frequency Oscillator — ரேடியோ அதிர்வெண் அலைவான்
Range of Phase — கலைக்கோண நெடுக்கம்
Rate of Frequency Modulation — அதிர்வெண் பண்பேற்ற வீதம்
Ratio of Fractional Change — மாற்றத்தின் கூற்றுத் தகவு
Real Number — மெய் எண்
Reduction — குறைபாடு
Repelled — விலக்கப்பட்ட
Resonance — ஒத்திசைவு
Resonance Accelerators — ஒத்திசைவு முடுக்கிகள்
Resonance Lines — ஒத்திசைவுக் கோடுகள்
Rest Energy — ஓய்வுநிலை ஆற்றல்
Rest Mass — ஓய்வுநிலை நிறை
Restoring Force — மீட்பு விசை
Resultant Field — தொகுபயன் புலம்
Retarding — கணக்கமடைதல்
Revolution Frequency — சுற்று அதிர்வெண்
Rotational Electric Field — சுழலும் மின்புலம்

S

Saturation — தெவிட்டுதல்
Scintillation Counter — மின்மினுப்பு எண்ணி
Sector — (கூறு) தொகுப்பு
Self Focussing — அகக் குவிப்பு
Simple Harmonic Motion — சீரிசை இயக்கம்
Sine Curve — சைன் வளைவு
Slope — சரிவு
Small perturbation — சிற்றுலைவு
Solid Magnet — திண்மைக் காந்தம்
Space Charge — சூழ் மின்னூட்டம்
Space Physics — அண்டவெளி இயற்பியல்
Stable Orbit — நிலையான தடம்
Stable Range Of Phase — நிலையான கலைக்கோண நெடுக்கம்
Stability — நிலைப்பாடு
Standing Wave — நிலை அலை
Steady State — நிலைமாறாச் சூழ்நிலை
Storage Ring — சேமிப்பு வளையம்
Strong Focussing — வன் குவிப்பு
Synchronous Energy — இசைவு ஆற்றல்

Synchronous Orbit — இசைவுறு தடம்
Synchronous Particle — இசைவுறு துகள்
Synchrocyclotron — சிங்க்ரோ சைக்ளோட்ரான்
Synchrotron — சிங்க்ரோட்ரான்
Synchrotron Oscillations — சிங்க்ரோட்ரான் அலைவுகள்

T.

Tangentially — தொடுவியலாக
Television — தொலைக் காட்சி
Theory of Relativity — சார்பியல் கொள்கை
Thermal Equilibrium — வெப்பச் சமநிலைப் பாடு
Thermionic Emission — வெப்ப அயனி வெளியீடு
Torque — திருப்பு இரட்டை
Trace (Matrix) — முதன்மை மூலைவிட்டக் கூறுகள்
Transformer — மின்மாற்றி
Transition Energy — திரிவுநிலை ஆற்றல்
Transit time Factor — கடக்குங் காலக் கூற்றெண்
Transuranic Elements — யுரேனியமூர்ந்த தனிமங்கள்
Travelling Wave — இயங்கும் அலை
Triode — டிரையோடு

U

Unit Angle — ஓரலகு கோணம்
Unit Angle of Revolution — ஓரலகு கோணச்சுற்று
Upper Plates — மேல் தகடுகள்
Uesful Range of Phases — பயனுள்ள கலைக்கோண நெடுக்கம்

V

Van de Graff Generator — வான்டி கிராஃப் இயற்றி
Vector — வெக்டார்
Velocity Counter — வேகவடிப்பான்
Vertical Direction — செங்குத்து திசை
Vertical Motion — செங்குத்து இயக்கம்
Vertical Oscillation — செங்குத்து அலைவு
Vertical Stability — செங்குத்து நிலைப்பாடு

W

Weak Focussing — மென் குவிப்பு
Weak Focussing Machine — மென் குவிப்புப் பொறி
Wiederö's Linear Accelerator — விதரோவின் நேரியல் முடுக்கி

Z

Zero — சுழியம்